

USAGE DE L'HYDROGÈNE POUR L'ALIMENTATION DES VÉHICULES AU QUÉBEC  
DANS UN CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Par  
Oscar Loko Kouamy Akamel

Essai présenté au Centre universitaire de formation  
en environnement et développement durable en vue  
de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Marc-J. Olivier

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Février 2019

## SOMMAIRE

Mots-clés : développement durable, énergies fossiles, gaz à effet de serre, hydrogène, piles à combustible, pollution, Québec, réchauffement climatique, santé, transport urbain

Le réchauffement climatique provoqué par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre du secteur des transports et la forte dépendance énergétique de ce secteur aux énergies fossiles se présente comme l'un des enjeux majeurs de toute société. En outre, la dépendance des moyens de transport urbain vis-à-vis des sources d'énergies fossiles, du fait de l'usage des moteurs à combustion interne, contribue non seulement à l'augmentation des nuisances sonores, mais également à la pollution de l'air atmosphérique, qui causent des dommages sur l'environnement et la santé des populations. Face à tous ces enjeux, certains pays comme la France, le Japon, l'Allemagne et les États-Unis ont fait le choix de l'utilisation de l'hydrogène comme carburant alternatif dans les transports afin d'atténuer les impacts associés aux véhicules classiques et contribuer ainsi au développement d'une mobilité propre à faibles émissions de gaz à effet de serre. C'est le cas notamment du gouvernement québécois qui a décidé, dans le cadre de sa politique énergétique 2030, d'ajouter l'hydrogène à l'offre initiale du cocktail de carburants de remplacement qui comprenait le bioéthanol, le biométhane et l'électricité.

Ainsi, l'objectif général de cet essai est d'analyser dans une perspective de développement durable, le choix de l'hydrogène comme vecteur énergétique alternatif pour l'alimentation des véhicules au Québec. Ultimement, des recommandations seront formulées afin que les acteurs de la filière hydrogène québécoise intègrent les principes du développement durable.

L'analyse a permis de démontrer que le projet de l'usage de l'hydrogène pour l'alimentation des véhicules au Québec intègre fortement les enjeux des dimensions écologique et sociale du développement durable. C'est le cas par exemple des enjeux associés à l'utilisation des ressources renouvelables, l'usage judicieux de l'énergie, la réduction des polluants atmosphériques et des gaz à effet de serre, la santé et la qualité de vie des populations. Cependant, il n'intègre pas suffisamment les enjeux associés aux dimensions éthique, économique, culturelle et de gouvernance. Néanmoins, vue sous l'angle de sa globalité, l'analyse permet de conclure que le projet s'inscrit dans une démarche de développement durable.

Toutefois, il importe que le gouvernement québécois s'engage stratégiquement en soutenant la recherche, le développement et la démonstration des technologies de l'hydrogène et des piles à combustible, afin de les rendre compétitives. Ensuite, qu'il procède à la mise en place d'incitations fiscales afin de stimuler la demande de l'hydrogène, et finance le déploiement d'un réseau d'infrastructures initiales de niches dans les principales régions du Québec afin de contribuer au développement de la demande et favoriser ainsi à moyen terme la transition vers le développement de technologies à hydrogène plus soutenables.

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier tout d’abord mon directeur d’essai, Monsieur Marc-J. Olivier, pour son accompagnement motivant et sa disponibilité en tout temps ainsi que pour ses remarques qui ont été toujours très pertinentes afin de faciliter l’avancement et l’achèvement de ce travail.

Aussi, j’aimerais remercier toutes les personnes qui m’ont apporté un soutien moral durant les moments les plus difficiles, notamment ma famille et mes amis. Sans oublier mon épouse Lydie, à qui je dois beaucoup de patience, et mon fils Chris-Emmanuel, qui ont souffert de longues périodes d’absences de ma part motivées par la rédaction de cet essai.

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1. SPÉCIFICITÉS DE L’HYDROGÈNE ET LES RISQUES ASSOCIÉS .....	3
1.1 Propriétés physiques et chimiques .....	3
1.2 Risques spécifiques .....	4
1.3 Production de l’hydrogène .....	6
1.4 Stockage de l’hydrogène .....	9
1.5 Transport et livraison de l’hydrogène.....	11
1.6 Technologies de la pile à combustible.....	14
1.7 Enjeux de l’usage de l’hydrogène .....	15
2. SITUATION DES CARBURANTS DE REMPLACEMENT AU QUÉBEC.....	17
2.1 Biocarburants liquides .....	17
2.2 Biocarburants gazeux : Biométhane ou gaz naturel renouvelable (GNR).....	18
2.3 Électricité .....	18
2.4 Gaz naturel .....	20
3. UTILISATION DE L’HYDROGÈNE DANS LE MONDE.....	24
3.1 Cas de l’Europe .....	24
3.1.1 Situation de la filière hydrogène en France.....	25
3.1.2 Situation de la filière hydrogène en Allemagne .....	28
3.2 Cas des États-Unis.....	30
3.3 Cas du Japon.....	34
3.4 Cadres réglementaires .....	35
4. SITUATION DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE AU QUÉBEC .....	43
4.1 Parties prenantes.....	43
4.1.1 Établissements d’enseignement et centres de recherche .....	43

4.1.2 Organisations gouvernementales.....	45
4.1.3 Organismes et entreprises du secteur industriel .....	45
4.2 État de la situation .....	49
4.2.1 Système énergétique du Québec.....	49
4.2.2 Historique du développement de la filière hydrogène québécoise .....	49
4.2.3 Perspectives .....	51
5. IMPACTS DE L’USAGE DE L’HYDROGÈNE .....	53
5.1 Impacts environnementaux.....	53
5.2 Impacts sociaux .....	55
5.3 Impacts économiques .....	57
6. ANALYSE .....	59
6.1 Méthodologie de l’analyse multicritère.....	59
6.1.1 Choix de la méthode.....	59
6.1.2 Identification et pondération des critères.....	59
6.1.3 Évaluation des critères.....	60
6.1.4 Évaluation de la performance .....	62
6.2 Résultats .....	63
6.3 Analyse des résultats et de la performance générale .....	73
7. POSITION ET RECOMMANDATIONS .....	79
CONCLUSION .....	84
RÉFÉRENCES.....	86
ANNEXE 1 – ACTEURS DE L’INDUSTRIE DE LA BIOÉNERGIE AU QUÉBEC .....	95
ANNEXE 2 – CRITÈRES ASSOCIÉS AUX DIMENSIONS DU DD .....	96
ANNEXE 3 – COMPLÉMENT D’INFORMATION SUR LES 35 QUESTIONS .....	99

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Électrolyse de l'eau .....	8
Figure 1.2	Exemple de cadres de neuf bouteilles .....	11
Figure 1.3	Semi-remorque à tubes pour le transport d'hydrogène gazeux comprimé .....	12
Figure 1.4	Réseaux de pipelines hydrogène d'Air Liquide du nord de l'Europe .....	13
Figure 1.5	Principe de la pile à combustible .....	14
Figure 2.1	Réseau de stations publiques de GNL et GNC sur la Route bleue .....	23
Figure 3.1	Exemple de station-service à hydrogène .....	26
Figure 3.2	Localisation des stations-service en Allemagne .....	29
Figure 3.3	Feuille de route du développement du programme « hydrogen fuel initiative » .....	30
Figure 3.4	Réseau de stations-service de ravitaillement en hydrogène de la Californie .....	32
Figure 3.5	Plan de financement des stations-service de la Californie .....	33
Figure 3.6	Nombre de véhicules électriques à PAC en Californie .....	33
Figure 4.1	Système de stockage de l'hydrogène (Boucle hydrogène) .....	47
Figure 6.1	Indice de priorisation .....	61
Figure 6.2	Graphique de performance générale .....	62
Figure 6.3	Graphique de performance générale du projet .....	73
Tableau 1.1	Propriétés physicochimiques de l'hydrogène gazeux, du méthane et des vapeurs d'essence .....	4
Tableau 1.2	Synthèse des caractéristiques des différents modes de stockage de l'hydrogène .....	10
Tableau 2.1	Acteurs de la filière électrique au Québec .....	19
Tableau 2.2	Portrait de l'approvisionnement gazier d'Énergir .....	20
Tableau 3.1	Quelques normes publiées par l'ISO TC 197 .....	36
Tableau 3.2	Quelques normes publiées par l'IEC TC 105 .....	37
Tableau 3.3	Liste de quelques directives européennes .....	38
Tableau 3.4	Liste de quelques guides publiés par l'EIGA .....	38
Tableau 3.5	Liste des réglementations, codes et normes en lien avec les infrastructures d'hydrogène au niveau fédéral .....	41
Tableau 4.1	Liste des entreprises, centres de recherche et organismes actifs dans la filière hydrogène au Québec .....	48
Tableau 6.1	Réponses possibles associées à l'évaluation des critères .....	61
Tableau 6.2	Valeurs de performance globale de chacune des six dimensions de DD .....	73

## LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie
AFHYPAC	Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible
AIE	Agence internationale de l'énergie
AQPER	Association québécoise de la production d'énergie renouvelable
AVÉQ	Association des véhicules électriques du Québec
BRCC	Borne de recharge à courant continu
CE	Commission européenne
CEA	<i>Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives</i>
CEC	<i>California Energy Commission</i> (Commission de l'énergie de la Californie)
CFEE	Coalition France pour l'Efficacité Énergétique
CGA	<i>Compressed Gas Association</i> (Association des gaz comprimés)
CGDD	Commissariat général au développement durable
CGEIET	Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies
CNTA	Centre national du transport avancé
CRE	Commission de régulation de l'énergie
DOT	<i>Department of Transportation</i> (Département du transport américain)
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GNC	Gaz naturel comprimé
GNL	Gaz naturel liquéfié
GIVÉI	Grappe industrielle des véhicules électriques et intelligents
H2ME	<i>Hydrogen Mobility Europe</i> (Mobilité hydrogène Europe)
ICPE	Installations classées pour la protection de l'environnement
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRS-ÉMT	Institut national de la recherche scientifique – Énergie, Matériaux et Télécommunications
IREQ	Institut de recherche d'Hydro-Québec
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organisation internationale de normalisation)
ITAQ	Institut du transport avancé du Québec
IVI	Institut du véhicule innovant
LSR	Liquéfaction, stockage et regazéification
MEF	Ministère de l'Économie et des Finances

MEIE	Ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations du Québec
MEIN	Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique de France
MELCC	Ministère de l'Environnement et la Lutte contre les changements climatiques
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec
MESI	Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation du Québec
METI	<i>Ministry of Economy, Trade and Industry</i> (Ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie japonais)
ML	Million de litre
MTES	Ministère de la Transition écologique et solidaire
MTMDET	Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> (Laboratoire national pour les énergies renouvelables des États-Unis)
OQLF	Office québécoise de la langue française
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i> (Administration de la sécurité et de la santé au travail)
PAC	Pile à combustible
PEM	Proton Exchange Membrane (Membrane échangeuse de proton)
PNIHPC	Programme national d'innovation hydrogène et piles à combustible
PT	Pétajoule
PTMOBC	Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Société des ingénieurs automobiles)
SOEC	<i>Solid Oxide Electrolyser Cell</i> (Électrolyseur à oxyde solide)
TEC	Transition énergétique Québec
UE	Union européenne
UL	<i>Underwriters Laboratories</i> (Laboratoires des Assureurs)
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
VEE	Véhicule entièrement électrique
VEPAC	Véhicule électrique à pile à combustible
VHR	Véhicule hybride rechargeable
VZE	Véhicule zéro émission



## LEXIQUE

Carburant alternatif	Carburant ou source d'énergie qui sert, au moins partiellement, de substitut aux carburants fossiles dans l'approvisionnement énergétique des transports (MTES, 2016).
Développement durable	Développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Il s'appuie sur une vision à long terme qui prend en compte le caractère indissociable des dimensions environnementale, sociale et économique des activités de développement (Office québécoise de la langue française [OQLF], 2016).
Empreinte carbone	Somme des émissions de gaz à effet de serre découlant des activités humaines (OQLF, 2016).
Gaz à effet de serre	Gaz présent dans l'atmosphère (dioxyde de carbone, oxyde nitreux, méthane, hexafluorure de soufre, hydrofluorocarbure, hydrocarbure perfluoré), d'origine naturelle ou anthropique, qui absorbe et renvoie les rayons infrarouges en provenance de la surface terrestre (OQLF, 2016).
Pile à combustible	Dispositif électrochimique qui recombine l'hydrogène avec l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Elle est constituée de cellules élémentaires, chacune composée de deux électrodes séparées par une membrane polymère qui joue le rôle d'électrolyte (ADEME, 2015).
Station-service à hydrogène	Infrastructure décentralisée de production sur site, de compression, de stockage, et de distribution d'hydrogène aux véhicules électriques à hydrogène. Elle se compose d'une source de production d'hydrogène (électrolyseur), un module de purification de l'hydrogène, d'une unité de compression, d'un système de stockage intermédiaire ou stockage tampon à haute pression ainsi qu'une borne de distribution qui permet d'alimenter les véhicules (ADEME, 2015).
Mix énergétique	Désigne la répartition des différentes sources d'énergie d'un pays ou d'une zone géographique (Coalition France pour l'Efficacité Énergétique [CFEE], s. d.).
Transition énergétique	Concept qui désigne le passage d'un système énergétique qui repose essentiellement sur des énergies fossiles, épuisables et émettrices de gaz à effet de serre à un mix énergétique centré sur les énergies renouvelables et une efficacité énergétique accrue (CFEE, s. d.).
Véhicule électrique à hydrogène	Véhicule électrique dont la chaîne de traction est alimentée par un système comprenant une pile à combustible et de l'hydrogène stocké sous forme gazeuse (Smart Grids – Commission de régulation de l'énergie [CRE], s. d.).

## INTRODUCTION

La problématique du réchauffement climatique, en lien avec l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, soulève des enjeux socioéconomiques et environnementaux qui préoccupent la grande majorité des dirigeants des pays du monde. À cet effet, le cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) indique clairement le rôle joué par les activités humaines, en l'occurrence l'usage des énergies fossiles, dans la hausse exceptionnelle de la concentration des GES actuels. Selon ce rapport, le lien entre les activités humaines et l'accroissement des températures constaté depuis 1950 est extrêmement probable (GIEC, 2013). De plus, la forte dépendance du système énergétique mondial par rapport aux énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), avec 81 % du mix énergétique primaire en 2017, contribue davantage à amplifier la problématique du changement climatique. Force est de constater des émissions totales de CO<sub>2</sub> liées à l'usage des combustibles fossiles qui a atteint un seuil historique de 32,7 Gt d'équivalents de CO<sub>2</sub> (eCO<sub>2</sub>) en 2017, soit une hausse de 1,4 % par rapport à celle de 2016, qui résulte principalement de la forte croissance économique mondiale, de la baisse des prix des combustibles fossiles et enfin de la réduction des efforts d'efficacité énergétique. (Agence Internationale de l'Énergie [AIE], 2018)

Le Québec ne fait pas figure d'exception devant le changement climatique. Son système énergétique, à la différence des autres pays du monde, se caractérise par une dépendance de 53 % aux énergies fossiles (soit 73 % représentés par le pétrole, 15 % par le gaz naturel et 1 % par le charbon) et de 47 % aux énergies renouvelables (Whitmore et Pineau, 2017, p.7). Par ailleurs, la production, le transport et la consommation d'énergies fossiles, au Québec, sont responsables de 70 % des émissions totales de GES. Ainsi, dans sa politique énergétique 2030, le gouvernement québécois a décidé de réduire de 40 % la quantité de produits pétroliers consommés. Pour ce faire, l'offre de carburants de remplacement devrait ajouter l'hydrogène au cocktail initial de bioéthanol, biométhane et électricité. Cela permettrait par la suite de réduire progressivement l'utilisation des sources fossiles alternatives que sont le gaz naturel, le gaz naturel liquéfié, le gaz naturel comprimé et le propane. Atteindre une cible de 100 véhicules à hydrogène au Québec en 2020 a donc été fixée dans le cadre de cette politique énergétique. (Gouvernement du Québec, 2016)

L'objectif général de cet essai est d'analyser dans une perspective de développement durable, le choix de l'hydrogène comme vecteur énergétique alternatif pour l'alimentation des véhicules au Québec. Pour ce faire, la description de la situation actuelle de l'utilisation des carburants alternatifs dans le secteur des transports québécois est réalisée. De plus, la définition des spécificités de l'hydrogène et des risques associés est présentée, suivie de la distinction des différents acteurs de la filière hydrogène au Québec. Par la suite, l'identification des impacts économiques, sociaux, environnementaux et politiques de l'utilisation

de l'hydrogène comme vecteur énergétique dans le transport est effectuée, suivie d'une analyse multicritère basée sur un outil de développement durable. Finalement, des recommandations qui favorisent l'émergence et la mise en place d'une industrie durable de l'hydrogène au Québec sont faites.

Compte tenu du fait que la filière hydrogène est inexistante au Québec, une attention particulière a été portée sur des références, à la fois crédibles et variées, provenant de la chaîne de valeur de la filière hydrogène développée dans certains pays considérés comme pionniers en la matière. Ce sont entre autres le Japon, l'Allemagne, les États-Unis et la France. Par ailleurs, pour assurer la qualité et la validité des sources, plusieurs critères d'analyse ont été identifiés puis appliqués systématiquement durant le processus de collecte des informations. Ces critères sont entre autres : l'actualité de la source d'information, la réputation de l'auteur, la provenance de la source, l'objectivité ainsi que l'exactitude de l'information.

Cet essai est subdivisé en sept parties. La première partie présente les spécificités de l'hydrogène et les risques associés. Les enjeux de l'usage de l'hydrogène, comme vecteur énergétique, dans le cadre de la mobilité électrique seront également abordés. Ensuite, la situation des carburants de remplacement au Québec est développée dans la deuxième partie. Un accent particulier sera mis, dans cette partie, sur le bioéthanol, le biométhane, l'électricité ainsi que les sources fossiles alternatives que sont le gaz naturel, le gaz naturel liquéfié et le gaz naturel comprimé. La troisième partie présente des exemples d'utilisation de l'hydrogène dans le monde, notamment les cas des États-Unis, le Japon et certains pays d'Europe. Une attention spéciale sera mise sur les cadres réglementaires existants dans ces pays. Ensuite, la quatrième partie analyse la situation de la filière hydrogène au Québec. Elle présentera les différents acteurs ainsi que le potentiel du Québec. Par la suite, le cadre de recherche sur les impacts de l'usage de l'hydrogène est abordé en cinquième partie suivie d'une analyse multicritère basée sur les critères d'un outil de développement durable. Finalement, des recommandations pour favoriser l'émergence et la mise en place d'une industrie durable de l'hydrogène au Québec sont présentées à l'issue de l'analyse multicritère.

## 1. SPÉCIFICITÉS DE L'HYDROGÈNE ET LES RISQUES ASSOCIÉS

L'objectif de ce chapitre est de présenter : la description des caractéristiques physicochimiques de l'hydrogène, les risques associés à son usage, la chaîne de valeur regroupant les étapes de production, stockage et distribution, conversion et utilisation de l'hydrogène, ainsi que les différentes technologies de piles à combustible (PAC) disponibles et les enjeux entourant l'usage de l'hydrogène comme vecteur énergétique dans le transport.

### 1.1 Propriétés physiques et chimiques

L'hydrogène a été découvert au XVIII<sup>e</sup> siècle, en 1763, par un scientifique britannique du nom de Henry Cavendish à la suite d'une réaction associant le zinc et l'acide chlorhydrique. Elle permit de séparer le gaz hydrogène qu'il nomma « air inflammable » parce qu'il brûle en présence de l'oxygène, puis forme de la vapeur d'eau. Ainsi, quelques années plus tard, le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier attribue le nom « hydrogène » à ce gaz, du préfixe « hydro », du grec (*hudôr*) signifiant « eau », et du suffixe « gène » du grec (*gennan*) signifiant « engendrer » qui en gros signifie né de l'eau. Cela, pour sa propriété à générer de l'eau par réaction avec l'oxygène. (Bento, 2010)

L'atome d'hydrogène (H) est le premier atome du tableau périodique des éléments. C'est l'élément chimique le plus simple dont l'isotope le plus stable (protium) est constitué seulement d'un proton et d'un électron. Puisque la masse de l'électron est négligeable devant celle des protons et des neutrons, alors ces derniers permettent de déterminer la masse des atomes. Ainsi, l'atome d'hydrogène, avec un seul proton dans son noyau, se présente comme l'élément le plus léger ainsi que le plus abondant sur terre. (Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible [AFHYPAC], 2017)

Concernant la molécule d'hydrogène, il est bon de noter qu'elle comprend deux atomes (H<sub>2</sub>). De plus, elle est incolore, inodore et non toxique, et se présente sous forme gazeuse à la pression et température ambiante. (AFHYPAC, 2017) Elle a par ailleurs, une très faible densité avec un coefficient de diffusion dans l'air très élevé (0,61 cm<sup>2</sup>/s) en comparaison au méthane (0,16 cm<sup>2</sup>/s) et à la vapeur d'essence (0,05 cm<sup>2</sup>/s), ce qui lui permet de s'élever naturellement et de se mélanger facilement à l'air ambiant (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie [ADEME], 2015).

L'hydrogène possède une forte quantité d'énergie (33 kWh/kg). En comparaison au gaz naturel et au gazole, par exemple, il est respectivement 2,5 et 3 fois plus puissant par unité de masse (AFHYPAC, 2017). À l'opposé, il est 3,5 fois plus faible que le gaz naturel par unité de volume (ADEME, 2015). Le tableau 1.1, à la page suivante, présente quelques propriétés physicochimiques de l'hydrogène gazeux en comparaison au méthane et aux vapeurs d'essence :

**Tableau 1.1 Propriétés physicochimiques de l'hydrogène gazeux, du méthane et des vapeurs d'essence**

(Modifié de : ADEME, 2015, p. 17).

Propriétés (À 0,1 MPA, 20 °C)	Hydrogène H <sub>2</sub>	Méthane CH <sub>4</sub>	Vapeur d'essence
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	0,08	0,7	4,4
Coefficient de diffusion dans l'air (cm <sup>2</sup> /s)	0,61	0,16	0,05
Température d'auto-inflammation dans l'air (°C)	585	537	228-501
Limites d'inflammabilité dans l'air (% volume) aux conditions normales de température et de pression	4-75	5,3-17	1-7,6
Limites de détonation dans l'air (% volume)	13-65	6,3-13,7	1,1-3,3
Énergie minimale d'inflammation pour un mélange air/combustible dans les proportions stœchiométriques (mJ)	0,02 (29,5 % H <sub>2</sub> dans l'air)	0,29 (9,5 % CH <sub>4</sub> dans l'air)	0,24 (1,8 % de vapeur d'essence dans l'air)
Énergie explosive (kg TNT/m <sup>3</sup> )	2,02	7,03	44,22
Vitesse de combustion dans l'air (m/s)	2,70	0,37	0,30
Vitesse de détonation (m/s)	1500-2100	1400-1800	1400-1700
Température de flamme (°C)	2045	1875	2200

## 1.2 Risques spécifiques

Les risques liés à l'usage de l'hydrogène, comme vecteur énergétique, sont multiples et sont généralement associés à des fuites dont les niveaux de criticité sont dans l'ensemble élevés (incendie, explosion) à faibles (anoxie, risque acoustique, risque cryogénique). Les fuites sont généralement occasionnées, dans le cadre des flottes de véhicules et des stations à hydrogène, par : des raccords défailants, la rupture de flexible sous pression dans les stations de distribution, la détérioration des matériaux sous l'effet de l'hydrogène (diffusion dans les polymères, fragilisation du métal présentant des défauts de structure, attaque de l'acier) et par perméation (pénétration dans certains matériaux). Il est bon de préciser que la grande majorité des industriels, de la filière hydrogène, intègre ces aléas liés aux fuites dans la conception et la fabrication des matériaux. Ainsi, ils utilisent par exemple « de l'aluminium, de l'acier faiblement allié, ou inoxydable et des matériaux polymères adaptés pour la distribution et le stockage du gaz ». (ADEME, 2015)

- L'anoxie

L'anoxie se produit généralement dans les milieux confinés, avec une forte accumulation en hauteur, en réduisant la concentration de l'oxygène qui provoque l'asphyxie chez l'homme. Ainsi, pour y remédier, il est recommandé d'installer des équipements de surveillance (explosimètre), couplés à « des dispositifs d'alarmes ou de coupures d'alimentation en hydrogène », qui mesurent continuellement la concentration de l'oxygène dans un milieu donné. (ADEME, 2015)

- Risque acoustique

Le risque acoustique survient généralement, à travers le bruit assourdissant généré, à la suite d'une fuite d'hydrogène sur «une canalisation ou sur une enceinte de stockage» du fait de stockage à haute de pression de l'hydrogène (350 ou 700 MPa). Il est recommandé de s'éloigner de la source du bruit afin d'atténuer ou de minimiser les conséquences. (ADEME, 2015)

- Risque cryogénique

Le risque cryogénique est généralement associé à l'usage incontrôlé de l'hydrogène liquide (température de -253 °C) dont «le contact avec la peau s'apparente à une brûlure thermique. [Ainsi,] il est primordial de porter des équipements de protection individuelle adaptés (gants, tablier cryogénique, lunettes)». (ADEME, 2015)

- Risque d'incendie

Le risque d'incendie constitue l'un des risques le plus important de l'hydrogène gazeux du fait de sa plage d'inflammabilité comprise entre 4 et 75 % ainsi que de sa faible énergie minimale d'inflammation (0,02 mJ). Les facteurs qui contrôlent ce risque comprennent «le débit [du gaz], la vitesse à la brèche, le degré de confinement, le type et l'instant d'inflammation». Ainsi, en présence d'un comburant (oxygène) et d'une énergie d'inflammation qui dépasse l'énergie minimale d'inflammation de l'hydrogène (étincelle ou point chaud), le phénomène «du jet enflammé ou feu torche» peut être observé. Ce dernier survient lors d'une inflammation immédiate, à la suite d'une fuite d'hydrogène à fort débit. Le flux thermique de la flamme peut causer des brûlures très graves chez l'homme. (ADEME, 2015)

- Risque d'explosion

Le risque d'explosion représente également, avec le risque d'incendie, le principal risque de l'hydrogène gazeux. L'explosion se produit généralement à la suite d'une fuite de fort débit ou petit débit, d'hydrogène, dans un milieu confiné et «correspond à une libération soudaine d'énergie entraînant la propagation d'un front de flamme et une onde de surpression». (AFHYPAC, 2015)

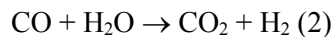
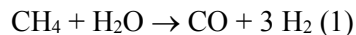
Ainsi, il existe deux types différents d'explosion qui sont en l'occurrence : la déflagration et la détonation. La différence entre les deux s'explique par le fait que : avec la déflagration, le front de la flamme se propage à «une vitesse subsonique, engendrant une augmentation continue de la pression dans les nuages gazeux» tandis qu'avec la détonation, «la vitesse de la propagation de la flamme est supersonique. La surpression a lieu de manière brutale engendrant une onde de choc». Parmi ces deux types d'explosion, la détonation est celle qui génère des «effets potentiellement les plus graves sur les personnes et les biens». (ADEME, 2015)

### 1.3 Production de l'hydrogène

L'hydrogène peut être produit sur place à la station-service, de manière décentralisée, donc à moindre coût ou encore plus loin de la station-service par l'entremise d'un système centralisé nécessitant la mise en place d'une infrastructure de transport et de distribution. Ainsi, les différents modes de production de l'hydrogène auront une incidence sur son prix final chez les usagers. (Bento, 2010) Par ailleurs, il est intéressant de préciser que la molécule d'hydrogène n'existe pas présentement à l'état naturel du fait de l'instabilité de l'atome d'hydrogène qui la constitue. Cependant, du point de vue atomique, l'hydrogène se présente comme l'élément chimique le plus abondant qui puisse exister sur la terre. (ADEME, 2015) Ainsi, l'obtention de ce gaz en quantité industrielle nécessite l'usage de certains procédés industriels. Parmi ceux-ci figurent le vaporeformage, certains procédés thermochimiques, et enfin l'électrolyse. (ADEME, 2011)

- Vaporeformage

Le procédé de vaporeformage, également dénommé « reformage à la vapeur », est le plus couramment utilisé aujourd'hui dans le monde (à plus de 95 %) à partir de sources primaires principalement constituées de combustibles fossiles. Il consiste à réaliser dans un premier temps la désulfuration d'un hydrocarbure léger ou du gaz naturel, puis à faire réagir le combustible résiduel « à haute température (entre 850 et 900 °C) et sous-pression (20 à 30 bars) en présence d'un catalyseur à base de nickel », permettant ainsi d'obtenir du monoxyde de carbone (CO) mélangé à de l'hydrogène (H<sub>2</sub>). Par la suite, le CO obtenu est utilisé dans une réaction secondaire en présence de vapeur d'eau pour générer davantage d'hydrogène qui en dernier lieu sera purifié. (Kalinowski et Pastor, 2013) Les réactions mises en œuvre dans le cas du méthane sont les suivantes :



Le procédé de vaporeformage a des avantages et des inconvénients :

Au titre des avantages, il peut être fait mention du fort rendement du procédé (approximativement 80 %) qui permet « d'atteindre, en sortie d'une unité de production industrielle, un coût attractif, de l'ordre de 2 euros par kilogramme d'hydrogène » auquel, il faut ajouter le coût de la distribution jusqu'à l'utilisateur. Ainsi, la production décentralisée de l'hydrogène à partir du gaz naturel par exemple, lorsque l'on intègre le coût de distribution, peut atteindre « un coût de l'ordre de 6 euros par kilogramme [d'hydrogène] ».

(Kalinowski et Pastor, 2013) À titre comparatif par exemple, ce cout de distribution de 6 euros/kg H<sub>2</sub> serait équivalent à 153 euros par mégawattheure (Beeker, 2014). Concernant les inconvénients, il faut noter que ce procédé contribue à l'émission de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui est un GES intervenant dans le réchauffement climatique. À titre d'exemple, « le vaporeformage du gaz naturel génère de l'ordre de [10 kg d'équivalents de CO<sub>2</sub>/kg] d'hydrogène ». (Kalinowski et Pastor, 2013)

- Procédés thermochimiques

Les procédés thermochimiques sont généralement appliqués aux hydrocarbures lourds et aux combustibles solides. Ils consistent, en ce qui concerne les hydrocarbures lourds, à la réalisation d'une oxydation partielle « à haute température (1200 à 1500 °C) et à pression élevée [permettant d'obtenir des résultats identiques à ceux du procédé de vaporeformage, mais avec] un cout de production deux fois plus élevé ». (Kalinowski et Pastor, 2013) Par ailleurs, en ce qui concerne les combustibles solides (charbon), les procédés thermochimiques de gazéification à haute température (800 à 1000 °C) et de pyrolyse à très haute température (supérieure à 1500 °C) sont généralement utilisés (ADEME, 2011). Tous ces procédés thermochimiques génèrent également du CO<sub>2</sub> avec l'émission par exemple : de 15 tonnes eCO<sub>2</sub> par tonne d'hydrogène produite pour le procédé d'oxydation partielle, et de 19 tonnes eCO<sub>2</sub> par tonne d'hydrogène produite pour celui de la gazéification (Viseur, 2008).

- Électrolyse

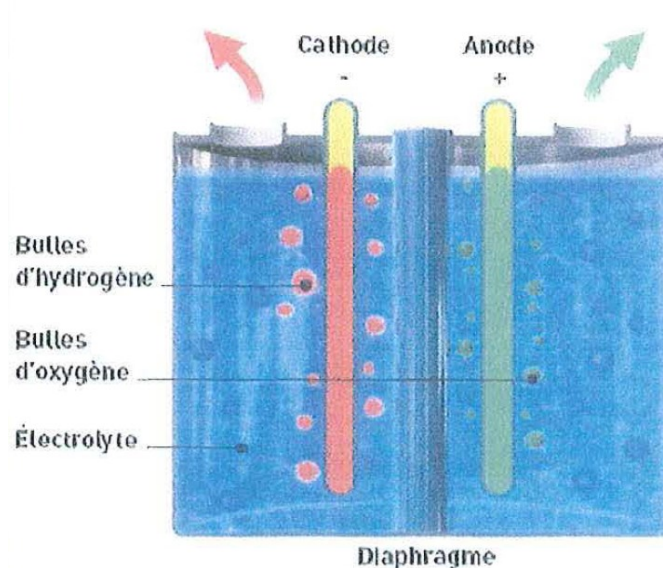
Le procédé d'électrolyse se présente comme le second procédé le plus utilisé au monde (4 %) après celui du vaporeformage présenté précédemment. Il consiste à l'aide d'un courant électrique continu, appliqué à un certain volume d'eau, circulant entre deux électrodes (anode et cathode) immergées dans un électrolyte, à réaliser chimiquement la dissociation de la molécule d'eau (H<sub>2</sub>O) en oxygène (O<sub>2</sub>) et hydrogène (H<sub>2</sub>) selon la réaction électrochimique suivante (Kalinowski et Pastor, 2013) :

(Oxydation à l'anode)  $2 \text{H}_2\text{O} + \text{électricité} \rightarrow 4 \text{H}^+ + \text{O}_2 + 4 \text{e}^-$  (Formation de O<sub>2</sub>)

(Réduction à l'cathode)  $2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$  (Formation de H<sub>2</sub>)

La figure 1.1 présente la réaction de l'électrolyse de l'eau, avec formation d'hydrogène qui migre vers la cathode et l'oxygène vers l'anode, en présence d'un courant électrique. L'alimentation en eau de l'électrolyseur est généralement de 1 L/Nm<sup>3</sup>, avec une consommation d'énergie comprise entre 0,1 et 2,5 kWh/Nm<sup>3</sup> (Tecnum International Inc. et Concept Celsius International Inc., 2013).





**Figure 1.1 Électrolyse de l'eau** (tiré de : Tecnum International Inc. et Concept Celsius International Inc., 2013, p.29).

L'électrolyte, facilitant la conduction des ions et ce faisant leur transfert, peut être liquide ou solide et permet ainsi de distinguer trois principales technologies d'électrolyse. Ce sont entre autres : les « électrolyseurs de type alcalin, à membrane à échange de proton (PEM ou *Proton Exchange Membrane*) et à électrolyte céramique solide ». (Kalinowski et Pastor, 2013) Les deux premières technologies font partie des méthodes d'électrolyses à basse température (inférieure à 200 °C) tandis que la dernière fait partie des électrolyses à haute température, qui excède 400 °C (ADEME, 2011). La technologie des électrolyseurs de type alcalin, utilisant une solution à base de potasse, plus ancienne (depuis plus de 100 ans) et donc plus mature, présente un rendement approximatif de 60 % et est moins onéreuse en comparaison de la technologie PEM, plus récente (depuis 2008) et à fort rendement, qui atteint environ 75 % (Kalinowski et Pastor, 2013). Les électrolyseurs à électrolyte céramique solide, encore appelés électrolyseurs à oxyde solide (SOEC ou *Solid Oxide Electrolyser Cell*), fonctionnant à haute température (500 à 800 °C), sont moins énergivores en comparaison des deux précédents, mais nécessitent l'usage de matériaux spécifiques pour leur conception (Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique de la France [MEIN], 2015). Cette dernière technologie pourrait à l'avenir « permettre d'abaisser le coût de production de l'hydrogène par électrolyse à moins de 5 euros, voire moins de 3 euros » (Kalinowski et Pastor, 2013).

Les coûts de production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau sont très élevés. Il est estimé que ce coût varie entre 5 et 10 euros par kilogramme d'hydrogène produit, et est dans l'ensemble « fonction de la taille de l'installation [et de son rendement ainsi que] du prix de l'électricité qui alimente [l'électrolyseur] » (Kalinowski et Pastor, 2013). Ainsi, ce coût est compétitif pour des prix d'électricité compris entre 0,01 et

0,02 \$/kWh (Bento, 2010). Par ailleurs, la technologie d'électrolyse présente l'avantage de n'émettre aucun GES lorsqu'elle est réalisée à partir d'une source d'énergie renouvelable (hydroélectricité, énergie éolienne, énergie solaire, biomasse et biogaz). (Kalinowski et Pastor, 2013) De plus, elle permet le stockage de l'électricité produite de manière intermittente à partir des sources d'énergie renouvelable, car « la production électrique excédentaire est transformée en hydrogène et ensuite stockée [...] puis [servira de] combustible pour les [véhicules] ou [sera] reconvertie en électricité et réinjectée dans le réseau » lors des fortes demandes (Bento, 2010).

#### **1.4 Stockage de l'hydrogène**

Il existe plusieurs modes de stockage de l'hydrogène qui sont fonction de son application finale. Ainsi, l'hydrogène peut être stocké sous formes gazeuse, liquide et solide (ADEME, 2015).

- **Stockage gazeux**

Le stockage gazeux est le mode de stockage le plus répandu, car l'hydrogène une fois produit se présente sous la forme gazeuse à la pression et température ambiante. Par ailleurs, du fait de ses propriétés physiques en lien avec sa très faible masse volumique ( $0,08 \text{ kg/m}^3$ ), l'hydrogène occupe donc un très grand volume à la température ambiante. (ADEME, 2015) Par exemple,  $11 \text{ m}^3$  est nécessaire pour stocker un 1 kg d'hydrogène, ce qui complique davantage la manipulation de ce gaz. La solution trouvée consiste à le comprimer puis à le stocker dans des contenants spécifiques afin de faciliter son transport. (AFHYPAC, 2017) Ainsi, pour les usages industriels courants, l'on procède au stockage de 750 g d'hydrogène à 20 MPa (200 bars) dans des bouteilles cylindriques spécifiques (50 litres). Dans les applications mobiles (transport), notamment dans les véhicules à hydrogène, les réservoirs sont conçus dans des matériaux spécifiques permettant d'atteindre des pressions de stockage d'hydrogène de 35 MPa ( $23 \text{ kg/m}^3$ ) ou 70 MPa (700 bars). La pression de stockage de 70 MPa « semble être le meilleur compromis entre densité énergétique, flexibilité, sécurité d'emploi et cout ». Néanmoins, « pour d'autres applications embarquées (bus), la solution de 35 MPa est privilégiée ». (ADEME, 2015)

- **Stockage liquide**

L'hydrogène peut également être stocké sous forme liquide, ce qui exige notamment de le refroidir en dessous de 20,3 K (ou  $-252,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) à la pression atmosphérique (ADEME, 2015). À cette température, l'hydrogène est « 800 fois plus dense qu'à la température ambiante [et] peut être stocké de façon plus compacte et moins lourde que dans les réservoirs à haute pression ». Toutefois, ce mode de stockage présente quelques inconvénients en lien avec : les forts couts d'investissement en capital, la consommation

d'énergie ainsi que la perte d'hydrogène, par évaporation, dans le réservoir (1 % par jour) du fait du mauvais fonctionnement de l'isolation thermique des cryostats. (Bento, 2010)

- **Stockage solide**

Ce mode de stockage permet de piéger les atomes d'hydrogène dans la maille cristalline d'un matériau absorbant solide, comme les hydrures, à « basse pression (moins de 3 MPa) et à température ambiante ou légèrement supérieure ». Lors du déstockage, l'on procède au chauffage du réservoir d'hydrure permettant ainsi de libérer l'hydrogène qui a été piégé. Le stockage solide est utilisé généralement pour les applications stationnaires de l'hydrogène, et est peu adapté pour les usages dans les véhicules du fait de la lenteur du processus d'absorption et de désorption de l'hydrogène ainsi que de la gestion du flux thermique dans le réservoir d'hydrure. (ADEME, 2015)

Finalement, il faut indiquer que les stockages gazeux et liquides apparaissent présentement comme les modes les plus économiques de stockage de l'hydrogène (Bento, 2010). Le tableau 1.2, ci-dessous, présente une synthèse des caractéristiques des différents modes de stockage de l'hydrogène :

**Tableau 1.2 Synthèse des caractéristiques des différents modes de stockage de l'hydrogène** (Modifié de : Gondor, 2008, p.29; Bento, 2010, p.51).

	Stockage gazeux	Stockage liquide	Stockage solide
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coûts en capital (compresseurs)</li> <li>• Utilisation flexible à plusieurs échelles</li> <li>• Technologie maîtrisée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleure densité énergétique que le stockage gazeux</li> <li>• Fortes économies d'échelle</li> <li>• Technologie maîtrisée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densité énergétique par volume (température et pression ambiantes)</li> <li>• Sûreté</li> <li>• Pureté du gaz livré</li> <li>• Température et pression de fonctionnement proches de l'état standard</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible densité énergétique</li> <li>• Coûts de capital plus élevés des conteneurs en comparaison avec le stockage liquide</li> <li>• Sécurité des bouteilles à haute pression à bord des véhicules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Température très basse (-253 °C)</li> <li>• Forts coûts en capital au niveau de la liquéfaction</li> <li>• Large apport d'électricité pour la liquéfaction (grande consommation d'énergie)</li> <li>• Difficulté d'isolation</li> <li>• Perte d'hydrogène par évaporation « <i>Boil off</i> »</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lourd</li> <li>• Forts coûts en capital</li> <li>• Pas d'économies d'échelle</li> <li>• Des développements nécessaires au niveau de la recherche et développement</li> <li>• Gestion des flux de chaleurs</li> </ul>
Capacité (kg)	0 - 1000	100 – 200 000	0 - 100

## 1.5 Transport et livraison de l'hydrogène

Le transport de l'hydrogène, une fois produit et stocké, se fait généralement par camion ou par pipeline.

- Transport par camion

L'utilisation du camion, adapté pour les petites quantités, permet de transporter l'hydrogène sous deux formes principales :

La première, concerne l'utilisation de « structures métalliques appelées cadres contenant plusieurs bouteilles reliées entre elles avec une seule sortie » (ADEME, 2015). Ces cadres peuvent individuellement emmagasiner au total environ 8 kg à plusieurs dizaines de kilogrammes d'hydrogène gazeux. De plus, une fois livrés à la station-service de distribution, ils se connectent directement aux « lignes d'alimentations gazeuses de la station ». (ADEME, 2015) La figure 1.2 présente un exemple de cadres contenant des bouteilles d'hydrogène interconnectées.



**Figure 1.2 Exemple de cadres de neuf bouteilles** (ADEME, 2015, p. 25).

La deuxième forme est directement liée à l'utilisation de « grands cylindres, appelés aussi tubes, sur une remorque contenant plusieurs centaines de kilos d'hydrogène (de 180 à 500 kg) ». Une fois sur le site de la station-service de distribution, l'hydrogène contenu dans les tubes est transféré dans un réservoir fixe préalablement installé. (ADEME, 2015) La figure 1.3 présente un exemple de camion semi-remorque transportant des tubes d'hydrogènes.



**Figure 1.3** Semi-remorque à tubes pour le transport d'hydrogène gazeux comprimé (tiré de : ADEME, 2015, p.24).

Précisons que l'hydrogène, contenu dans les cadres, est stocké généralement à la pression standard de 20 MPa (200 bars). Par ailleurs, l'on note aussi « des cadres à 35 MPa (350 bars) et des développements sont en cours pour fournir une logistique à 50 MPa (500 bars), voire 70 MPa (700 bars) ». (ADEME, 2015)

- Transport par pipeline

Le transport par pipeline est généralement réservé pour les grandes quantités d'hydrogène gazeux. Bien que le coût d'investissement dans ce type d'infrastructure soit très élevé, le transport par pipeline « s'avère être le plus économique et sera probablement amené à connaître une forte croissance dans [l'avenir] ». (Viseur, 2008) Par ailleurs, à défaut de l'existence d'une infrastructure dédiée uniquement au transport de l'hydrogène, ce gaz pourrait être transporté en le mélangeant avec le gaz naturel dans son réseau de transport; cela nécessiterait par exemple « des opérations en début et fin de réseau pour mélanger et récupérer l'hydrogène » (ADEME, 2015). Ainsi, selon certaines études menées en Europe, le mélange des deux gaz (hydrogène et gaz naturel) pourrait être réalisé lors du transport, par pipeline, avec des proportions maximales de 20 % en concentration d'hydrogène (AFHYPAC, 2016a).

Des exemples de pipelines d'hydrogène existent à travers le monde; au nombre desquels figure celui de l'Europe de l'Ouest, d'une longueur d'environ 1600 km, qui parcourt le nord de la France, la Belgique et les Pays-Bas. La distribution de ce réseau est présentée en rouge à la figure 1.4. Outre l'exemple de l'Europe, les États-Unis comptabilisent au total environ 1150 km de pipelines dédiés à l'hydrogène. (AFHYPAC, 2016a)



**Figure 1.4 Réseaux de pipelines hydrogène d'Air Liquide du nord de l'Europe** (tiré de : AFHYPAC, 2016a, p.2).

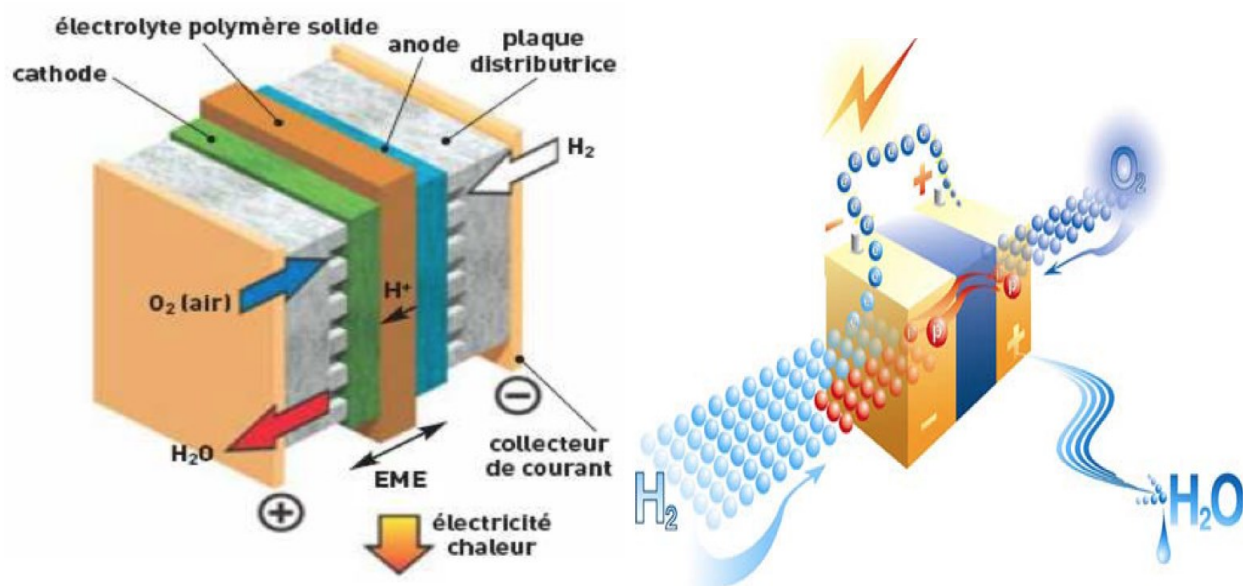
En somme, il est important de préciser que les coûts liés aux transports de l'hydrogène font partie des principaux facteurs limitants qui entravent le développement des utilisations énergétiques de l'hydrogène, car ils contribuent à l'augmentation du prix final chez les usagers. De plus, il faudrait ajouter à cette problématique du transport de l'hydrogène, celle du déploiement d'un réseau suffisamment dense de stations-service qui devront être approvisionnées régulièrement, en hydrogène, afin de répondre à la demande des usagers qui voudront faire le plein de leurs véhicules. (Kalinowski et Pastor, 2013) En effet, le prix actuel d'une station-service de distribution d'hydrogène est d'environ 1,5 million d'euros, sans oublier que « la compression permettant de remplir les réservoirs des véhicules à 700 bars dépense l'équivalent de 20 % du contenu énergétique de l'hydrogène distribué ». Par conséquent, le coût final à la pompe est de 3 à 4 euros/kg H<sub>2</sub>. (Becker, 2014) Ainsi, il apparaît clairement que la compétitivité de



l'hydrogène, comme vecteur énergétique dans le transport, passera nécessairement par la mise en place d'un réseau de production décentralisée, sur le site même des stations-service à travers l'installation d'électrolyseurs, évitant ainsi les couts de transport qui influencent à la hausse le prix final de l'hydrogène à la pompe. La prise en compte de cette solution impliquerait que le paramètre du cout de revient du kilowattheure utilisé lors de l'électrolyse soit pris en compte dès le départ (Beeker, 2014).

## 1.6 Technologies de la pile à combustible

La pile à combustible (PAC), utilisée dans les applications de mobilité hydrogène, permet de réaliser la réaction inverse de l'électrolyse, notamment en favorisant la combinaison de l'hydrogène gazeux et de l'oxygène de l'air, à travers une réaction électrochimique, permettant ainsi de produire de l'électricité sous la forme de courant continu, de la chaleur ainsi que de la vapeur d'eau (Bento, 2010). Elle se compose de deux électrodes, l'anode et la cathode servant à recevoir respectivement l'hydrogène sous forme gazeuse et l'oxygène de l'air, séparées par un électrolyte qui est un matériau facilitant le passage des ions (Gondor, 2008). La figure 1.5 présente le schéma du principe de fonctionnement de la PAC.



**Figure 1.5 Principe de la pile à combustible** (tirés de : Gondor, 2008, p.21; Bento, 2010, p.20).

Ainsi, le principe de la PAC consiste principalement dans un premier temps à la séparation des atomes d'hydrogène en proton et électron à l'anode permettant de générer de l'électricité à partir des électrons circulants via un circuit externe, puis au passage des protons à travers « l'électrolyte jusqu'à arriver à la cathode où ils se combinent avec l'oxygène et les électrons en dégageant de l'eau et de la chaleur ». (Bento, 2010)

Il est important de préciser qu'il existe plusieurs technologies de PAC adaptées à des applications diverses, dont deux catégories principales qui comprennent : les piles à basse température (entre 60 et 200 °C) à « membrane d'échange de protons ou à membrane électrolyte polymère pour *Proton Exchange Membrane Fuel Cells* ou *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells* [PEMFC] », bien adaptées pour les applications de mobilité (notamment dans le transport); et les piles à haute température (entre 800 °C et 1050 °C), communément appelées piles « à oxydes solides ou SOFC (*Solid Oxide Fuel Cells*), mieux adaptées aux applications stationnaires, comme la cogénération [dans les bâtiments] ». (Kalinowski et Pastor, 2013)

Les progrès récents dans le domaine de la recherche et développement, concernant les deux catégories de PAC, ont permis de lever certains verrous sur le plan du prix, de la fiabilité et de la durée de vie de ces technologies, permettant ainsi de multiplier les applications énergétiques de l'hydrogène. Ainsi, « en 2012, 46 000 [PAC] ont été commercialisées dans le monde, soit une croissance de 86 % en un an ». (Kalinowski et Pastor, 2013) Parmi ces nouvelles applications, l'on pourrait citer par exemple l'usage de l'hydrogène pour l'autonomie énergétique de certains sites isolés (comme les antennes relais et les bases de télécommunications), les engins de manutention (charriots élévateurs) fonctionnant en milieu confiné ainsi que les « groupes électriques de secours pour des usages critiques ou stratégiques (serveurs informatiques, hôpitaux) » (Beeker, 2014).

Enfin, il faut indiquer par ailleurs que malgré les progrès réalisés, les PAC utilisées dans la mobilité hydrogène ont un coût encore très élevé sur le marché. Les coûts varient de « 500 euros/kWe à 3200 \$/kWe », soit un coût de 30 000 euros pour un moteur électrique ayant une puissance de 60 à 70 kW (Beeker, 2014). Selon les sources consultées, les rendements actuels varient entre 30 et 60 % (Beeker, 2014 ; Kalinowski et Pastor, 2013). Outre ces facteurs, il est bon de noter une amélioration en ce qui concerne la durée de vie des PAC PEMFC qui a atteint « 25 000 heures, ce qui équivaut à une distance parcourue de 150 000 kilomètres » (Kalinowski et Pastor, 2013).

### **1.7 Enjeux de l'usage de l'hydrogène**

Plusieurs enjeux sont associés à l'usage de l'hydrogène. Ces enjeux comprennent :

- La croissance de la consommation énergétique

Selon le dernier rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), la demande mondiale d'énergie a augmenté de « 2,1 % en 2017, contre 0,9 % l'année précédente et 0,9 % en moyenne au cours des cinq années précédentes ». Par ailleurs, les données indiquent que « 72 % de la hausse a été satisfaite par les combustibles fossiles, un quart par les énergies renouvelables et le reste par le nucléaire ». (AIE, 2018) Selon les prévisions, les besoins énergétiques mondiaux augmenteront à l'horizon 2040 pour atteindre



près de 30 % (AIE, 2017). Cette croissance de la demande énergétique soulève la problématique de la dépendance énergétique mondiale vis-à-vis des sources fossiles qui, à moyen et long terme, ne sont pas des durables, car elles constituent des sources épuisables. Ainsi, l'augmentation de l'offre énergétique grâce à la proposition de sources alternatives aux sources fossiles, comme l'hydrogène produit à partir des sources d'énergies renouvelables, apparaît comme un enjeu stratégique pour tous les pays, car elle favoriserait la préservation des ressources fossiles ainsi que l'indépendance énergétique de ces pays.

- L'augmentation des nuisances liées aux usages énergétiques, notamment en milieu urbain

La dépendance des moyens de transport urbain et périurbain vis-à-vis des sources d'énergies fossiles, du fait de l'usage des moteurs à combustion interne, contribue non seulement à l'augmentation des nuisances sonores, comme le bruit environnemental, mais également à la pollution de l'air atmosphérique qui causent des dommages sur l'environnement et la santé des populations. Les polluants couramment émis comprennent : « [le monoxyde de carbone], les particules, les oxydes d'azote et les composés organiques volatils ». (ADEME, 2011) Ainsi, l'usage de l'hydrogène, comme vecteur énergétique dans le transport, contribuera à réduire ces nuisances et améliorer la qualité de l'air dans les villes (AFHYPAC, 2017).

- L'augmentation des gaz à effet de serre

Les émissions des principaux GES (le dioxyde de carbone [CO<sub>2</sub>], le méthane [CH<sub>4</sub>], l'oxyde nitreux [N<sub>2</sub>O], les hydrofluorocarbures [HFC], le perfluorocarbure [PFC] et l'hexafluorure de soufre [SF<sub>6</sub>]) ne font qu'augmenter chaque année. Il est à noter que ces « émissions ont augmenté de plus de 80 % depuis 1970 et de 45 % depuis 1990 pour atteindre 49 Gt eCO<sub>2</sub> en 2010 et 54 Gt eCO<sub>2</sub> en 2013 ». Les données de 2015 indiquent que 65 % des émissions de GES dans le monde sont liées à la combustion d'énergie fossile et aux procédés industriels, dont le CO<sub>2</sub> représente près de 85 % de ce total. Ainsi, parmi les secteurs contributeurs aux émissions de CO<sub>2</sub> au monde, du fait de la combustion des énergies fossiles, ceux en lien avec la production d'électricité (40 %), les centrales à charbon (31 %), le transport (23 %), l'industrie et la construction (19 %) et enfin le secteur résidentiel (6 %) apparaissent comme les plus représentatifs. (Commissariat général au développement durable [CGDD], 2018) L'utilisation de l'hydrogène, produit à partir des sources d'énergies renouvelables, comme l'éolien, le solaire et l'hydroélectricité, « en substitution des énergies fossiles dans les usages finaux, et plus spécifiquement dans les usages diffus, générera des réductions nettes d'émissions de gaz à effet de serre » (ADEME, 2011).

## **2. SITUATION DES CARBURANTS DE REMPLACEMENT AU QUÉBEC**

Ce chapitre présente la situation actuelle des carburants de remplacement utilisés dans le secteur des transports au Québec. Il s'agira entre autres de présenter la situation des biocarburants liquides (bioéthanol et biodiésel), biocarburants gazeux (biométhane), l'électricité ainsi que celle des sources fossiles alternatives que sont le gaz naturel, le gaz naturel liquéfié et le gaz naturel comprimé. Quelques acteurs des différentes filières de la bioénergie, au Québec, sont présentés dans le tableau A.1.1 à l'annexe 1.

### **2.1 Biocarburants liquides**

Le vocable « biocarburant » regroupe l'ensemble des carburants liquides, solides ou gazeux produits à partir de la biomasse. Ces carburants, communément appelés carburants de remplacement, apparaissent comme « l'une des solutions pour réduire la consommation de pétrole dans le secteur du transport, et sont généralement utilisés sous forme d'additif ou de complément aux carburants fossiles ». (Ministère de la Transition écologique et solidaire [MTES], 2016)

La filière des biocarburants liquides au Québec regroupe principalement le bioéthanol (incorporé à l'essence) et le biodiésel (incorporé au diésel), qui représentent des combustibles liquides permettant de remplacer les combustibles fossiles traditionnels tels que l'essence et le carburant diésel (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec [MERN], 2018). La production annuelle de bioéthanol au Québec est estimée à environ 175 millions de litres (ML) d'éthanol de première génération, représentant 39 % des besoins annuels de ce combustible. Ainsi, pour satisfaire à la demande intérieure, le gouvernement québécois importe chaque année 275 ML de ce combustible. En ce qui concerne le biodiésel, le Québec produit chaque année environ 60 ML, ce qui représente le tiers des besoins du marché. (MERN, s. d.) Par ailleurs, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation indique que le Québec aurait une capacité de produire « environ 100 ML/an de carburant diésel renouvelable à partir de la biomasse résiduelle, comme le gras animal ou les huiles de fritures recyclées » (MERN, 2015).

Le gouvernement fédéral canadien a élaboré un règlement sur les carburants renouvelables qui permet de « [fixer] une teneur moyenne de 5 % pour l'éthanol et de 2 % pour le biodiésel/diésel renouvelable basée sur les volumes commercialisés au Canada ». Ainsi, certaines provinces comme la Saskatchewan, le Manitoba et la Colombie-Britannique ont intégré ce règlement sur leur territoire permettant d'avoir respectivement des teneurs minimales en éthanol de 7,5 % (Saskatchewan), de 8,5 % (Manitoba) et en biodiésel de 4 % (Colombie-Britannique). Les teneurs minimales augmenteront progressivement pour atteindre des proportions de 15 % (soit 15 % d'éthanol et 85 % d'essence) d'ici 2030. (Association québécoise de la production d'énergie renouvelable [AQPER], 2017) Le Québec n'est pas en reste, car son

gouvernement envisage d'adopter très bientôt un règlement sur les biocarburants qui épouserait les exigences de celui du gouvernement fédéral (Gouvernement du Québec, 2016).

## **2.2 Biocarburants gazeux : Biométhane ou gaz naturel renouvelable (GNR)**

Au Québec, le biométhane est principalement généré à partir du processus de biométhanisation des matières premières issues des résidus de culture, boues d'épuration, fumiers, lisiers et matières résiduelles putrescibles (municipales ou industrielles) (MERN, 2015). La valorisation du biométhane issu de ce processus a tardé à prendre son envol au Québec, du fait « des faibles coûts des autres énergies et de l'enfouissement des matières résiduelles organiques ». Ainsi, « brûler le gaz résiduel à la torchère était la solution [la] moins coûteuse [qui était privilégiée] ». À titre d'exemple, le taux de la valorisation de la matière organique en 2008 n'était que de 12 %. Par la suite, plusieurs projets de biométhanisation ont vu le jour grâce à certains programmes et mesures mis en place par le gouvernement ; notamment le Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage (PTMOBC). Les objectifs du PTMOBC sont de réduire la quantité de matières organiques destinées à l'élimination et réduire les émissions de GES au Québec. (Audette, 2016)

Parmi les nouveaux projets réalisés au Québec, les exemples suivants peuvent être énumérés : le projet de Saint-Hyacinthe finalisé en 2017 (avec une capacité de 16 millions de m<sup>3</sup> [Mm<sup>3</sup>]), les projets de Varennes et Granby (finalisation prévue en 2018 avec une capacité de 3 Mm<sup>3</sup> chacun) et le projet de Beauharnois (finalisation prévue en 2019 avec une capacité de 2 Mm<sup>3</sup>) (Gaz Métro, 2017). Ainsi, selon une étude de Gaz Métro, le potentiel à court terme du biométhane au Québec serait estimé à environ 50 à 100 Mm<sup>3</sup>/an, ce qui représenterait entre 1 à 2 % du gaz consommé au Québec (Audette, 2016). Une partie du biométhane généré au Québec est injecté dans le réseau de distribution de Gaz Métro où il servira plus tard à alimenter des « véhicules sous la forme comprimée ou liquéfiée ». Enfin, il est intéressant de préciser que le biométhane (gaz naturel renouvelable) « permet de réduire les particules fines et les polluants atmosphériques (NOx) jusqu'à 90 % par rapport au diesel ». Ce gaz alimente présentement déjà 28 % des véhicules, utilisant le gaz naturel, au Québec. (Énergir, 2017i)

## **2.3 Électricité**

La filière des véhicules électriques est en plein essor au Québec. Les données disponibles, en 2017, font état d'un parc de véhicules rechargeables (véhicules légers électriques et hybrides) en circulation, estimé à environ 16 200 véhicules, permettant ainsi de hisser le Québec au 1<sup>er</sup> rang des ventes de véhicules électriques au Canada (Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation [MESI], 2017b). Les données actualisées indiquent qu'au 31 mars 2018, un total de 24 442 véhicules électriques ont été commercialisés au Québec, en proportion de 54 % de véhicules hybrides rechargeables (VHR) contre

46 % de véhicules entièrement électriques (VEE) (Association des véhicules électriques du Québec [AVÉQ], 2018).

Concernant le développement des infrastructures de recharge, les données en lien avec les usages actuels indiquent qu'au 31 mars 2018, ce sont environ 3300 bornes de recharge (publique et privée), dont 750 gratuites, qui ont été installées au Québec (AVÉQ, 2018). Précisons qu'en 2017, il existait au total 1830 bornes de recharge publiques au Québec (MESI, 2017b). Les infrastructures au Québec comprennent six réseaux de recharge, notamment le Circuit électrique comptant 1370 bornes en mars 2018, dont 113 bornes de recharge à courant continu (BRCC), se présentant comme « le réseau public de stations de recharge le plus important du Canada » (AVÉQ, 2018).

La filière des véhicules électriques au Québec englobe environ 58 entreprises manufacturières et 30 centres et groupes de recherche universitaires, collégiaux et privés; permettant ainsi de générer près de 4700 emplois directs et indirects (MESI, 2017b). Le tableau 2.1 présente quelques acteurs de la filière électrique au Québec.

**Tableau 2.1 Acteurs de la filière électrique au Québec** (compilé de : MESI, 2017b, p.4-5).

Secteur	Acteurs	Description
Organismes (voués au développement de la filière)	Grappe industrielle des véhicules électriques et intelligents (GIVÉI)	Mobilise l'industrie, les usagers, le milieu de la recherche et de l'innovation ainsi que celui de l'enseignement pour optimiser la croissance et le rayonnement de la filière.
	Pôle d'excellence québécois en transport terrestre	Accompagne les fabricants de matériel de transport membres dans la commercialisation de leurs produits.
Établissements d'enseignement/ Centre de recherche	Université du Québec à Trois-Rivières	Travaille sur les PAC pour les véhicules électriques grâce à son Institut de recherche sur l'hydrogène.
	Centre de technologies avancées BRP-UdeS	Offre une expertise industrielle et universitaire à l'industrie du transport dans le domaine la propulsion électrique et hybride.
	InnovÉE	Spécialisé en recherche collaborative industrie-université sur des projets liés à l'électrification des transports.
	Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ)	Spécialisé dans le domaine des matériaux de batteries pour le transport et conçoit des systèmes de stockage d'énergie.
	Institut de véhicule innovant	Spécialisé dans l'ingénierie et la conception de solutions technologiques pour des projets axés sur les véhicules électriques et hybrides.
	PMG Technologies	Spécialisé dans la réalisation de tests de conformité sur les véhicules électriques et innovants.

Le gouvernement québécois, dans le cadre de sa politique stratégique en lien avec son Plan d'action en électrification des transports, envisage « d'augmenter le nombre de véhicules électriques dans le parc automobile du Québec ». Ainsi, il s'est fixé comme objectif d'atteindre une cible de 100 000 véhicules électriques et hybrides rechargeables à l'horizon 2020. (Gouvernement du Québec, 2015)

## 2.4 Gaz naturel

La filière du gaz naturel est largement implantée au Québec avec un réseau de distribution qui s'étend sur environ 10 950 km, géré par deux entreprises, soit Énergir (anciennement Gaz Métro, filiale de Valener) et Gazifère (filiale d'Enbridge). (Audette, 2016; Énergir, 2017a)

Le réseau de distribution d'Énergir couvre environ « 97 % du gaz consommé au Québec [et] s'étend sur plus de 10 000 km [permettant ainsi d'assurer] le service auprès d'environ 200 000 clients » (Énergir, 2017a). À l'opposé, celui de l'entreprise Gazifère ne s'étend que sur 950 km, ce qui permet la couverture de service de 41 500 clients (Audette, 2016). Le réseau d'Énergir, principalement souterrain, permet de desservir le secteur résidentiel, commercial et industriel (Énergir, 2017a). Le tableau 2.2 présente le portrait de l'approvisionnement gazier d'Énergir, au Québec, sur la période comprise entre 2013 et 2015.

**Tableau 2.2 Portrait de l'approvisionnement gazier d'Énergir** (modifié de : Énergir, 2017c).

				2013	2014	2015
Volume totale distribuée (PJ)				207	223,2	222,8
1. Gaz naturel fourni par Gaz Métro (gaz de réseau)	Pourcentage du volume total distribué (%)			39,1	39,8	39
	Volume distribué en gaz de réseau (PJ)			80,9	88,8	87
	Préparation des achats par point	Dawn	Pourcentage de gaz de réseau (%)	74	84,3	60,5
			Volumes (PJ)	59,9	74,9	52,6
			Nombre de fournisseurs	12	12	12
			Pourcentage du volume total distribué (%)	28,9	33,6	23,6
		Empress	Pourcentage de gaz de réseau (%)	25,7	15,4	39,4
			Volumes (PJ)	20,8	13,7	34,3
			Nombre de fournisseurs	14	19	20
			Pourcentage du volume total distribué (%)	10	6,1	15,4
		Territoire de Gaz Métro	Pourcentage de gaz de réseau (%)	0,2	0,2	0,1
			Volumes (PJ)	0,2	0,2	0,1
			Nombre de fournisseurs	2	1	1
			Pourcentage du volume total distribué (%)	0,1	0,1	0,1

**Tableau 2.2 Portrait de l’approvisionnement gazier d’Énergir** (modifié de : Énergir, 2017c) (suite).

				2013	2014	2015
2. Gaz naturel acheté par la clientèle (achat direct)	Nombre de clients			3300	3534	3774
	Pourcentage du volume total distribué (%)			60,9	60,2	61,0
	Volume distribué en achat direct (PJ)			126,1	134,4	135,8
	Achat direct avec service de transport de Gaz Métro	Dawn	Pourcentage du volume en achat direct (%)	0,0	0,0	0,0
			Volumes (PJ)	0,0	0,0	0,0
			Nombre de clients	0	0	0
			Pourcentage du volume total distribué (%)	0,0	0,0	0,0
		Empress	Pourcentage du volume en achat direct (%)	73,1	93,3	96,2
			Volumes (PJ)	92,2	122,7	130,7
			Nombre de clients	3125	3371	3706
			Pourcentage du volume total distribué (%)	44,5	55	58,7
	Achat direct avec transport du client	Territoire de Gaz Métro	Pourcentage du volume en achat direct (%)	26,9	8,7	3,8
			Volumes (PJ)	33,9	11,7	5,1
			Nombre de clients	175	163	68
			Pourcentage du volume total distribué (%)	16,4	5,2	2,3

En 2015 par exemple, selon les informations disponibles, un volume total de 222,8 pétajoules (PJ) de gaz naturel a été consommé au Québec. Ce volume comprenait les quantités de gaz directement acheté par Énergir (environ 87 PJ, soit 39 % du gaz distribué) auprès de ses fournisseurs à Dawn (52,6 PJ, soit 23,6 % du gaz distribué) dans le sud de l’Ontario, à Empress (34,3 PJ, soit 15,4 % du gaz distribué) en Alberta, et enfin au Québec (0,1 PJ, soit 0,04 % du gaz distribué) auprès des fournisseurs de biogaz, ainsi que le gaz directement acheté par de tiers fournisseurs localisés au Québec (135,8 PJ, soit 61 % du gaz distribué), mais qui a été distribué à travers le réseau gazier d’Énergir. (Énergir, 2017c)

Dans le secteur résidentiel, le gaz naturel est utilisé principalement pour le chauffage de l’air et de l’eau, la cuisson et le séchage, permettant ainsi de satisfaire 139 931 clients à hauteur de 567 Mm<sup>3</sup>; ce qui représente 9,9 % de la distribution de gaz naturel (Énergir, 2017b).

La clientèle commerciale et institutionnelle (hôpitaux, écoles, entrepôts, immeubles de bureaux, commerces, restaurants) utilise le gaz naturel principalement pour le chauffage (Énergir, 2017a). Au total 49 552 clients ont été servis dans ce secteur, ce qui représente un volume de 1 728 Mm<sup>3</sup> de gaz naturel, soit 30,2 % du gaz distribué (Énergir, 2017b).

Enfin, le secteur industriel (les alumineries, les minières, les papetières, l’agroalimentaire et la métallurgie) utilise le gaz naturel, en remplacement du mazout, pour les procédés de transformations ainsi que le chauffage de l’air et de l’eau. Cet usage a l’avantage de permettre la réduction des émissions de

GES de ce secteur, d'environ 32 %, de supprimer la presque totalité des « émissions d'oxydes d'azote et de soufre de même que les particules fines, tout en économisant jusqu'à 40 % des couts d'énergie ». (Énergir, 2017a) Le nombre total de clients desservis par le secteur industriel est estimé à environ 7 767 sur l'ensemble du territoire québécois pour un volume total gaz consommé d'environ 3 425 Mm<sup>3</sup> représentant 59,9 % du gaz naturel distribué (Énergir, 2017b).

Dans le secteur du transport, le gaz naturel est généralement utilisé comme carburant pour le transport routier sous la forme liquéfiée (gaz naturel liquéfié) ou comprimée (gaz naturel comprimé).

- Gaz naturel liquéfié (GNL)

Au Québec, le GNL provient principalement « de l'usine de liquéfaction, stockage et regazéification (LSR) de Gaz Métro, située dans l'est de Montréal et en fonction depuis 45 ans ». Le gaz naturel est refroidi à une température de -160 °C, facilitant son passage de l'état gazeux à l'état liquide, lui permettant ainsi d'occuper 600 fois moins de volume qu'à l'état gazeux ; ce qui facilite son entreposage dans des réservoirs cryogéniques ainsi que son transport. La capacité actuelle de l'usine est d'environ 255 Mm<sup>3</sup>/an. (Énergir, 2017e)

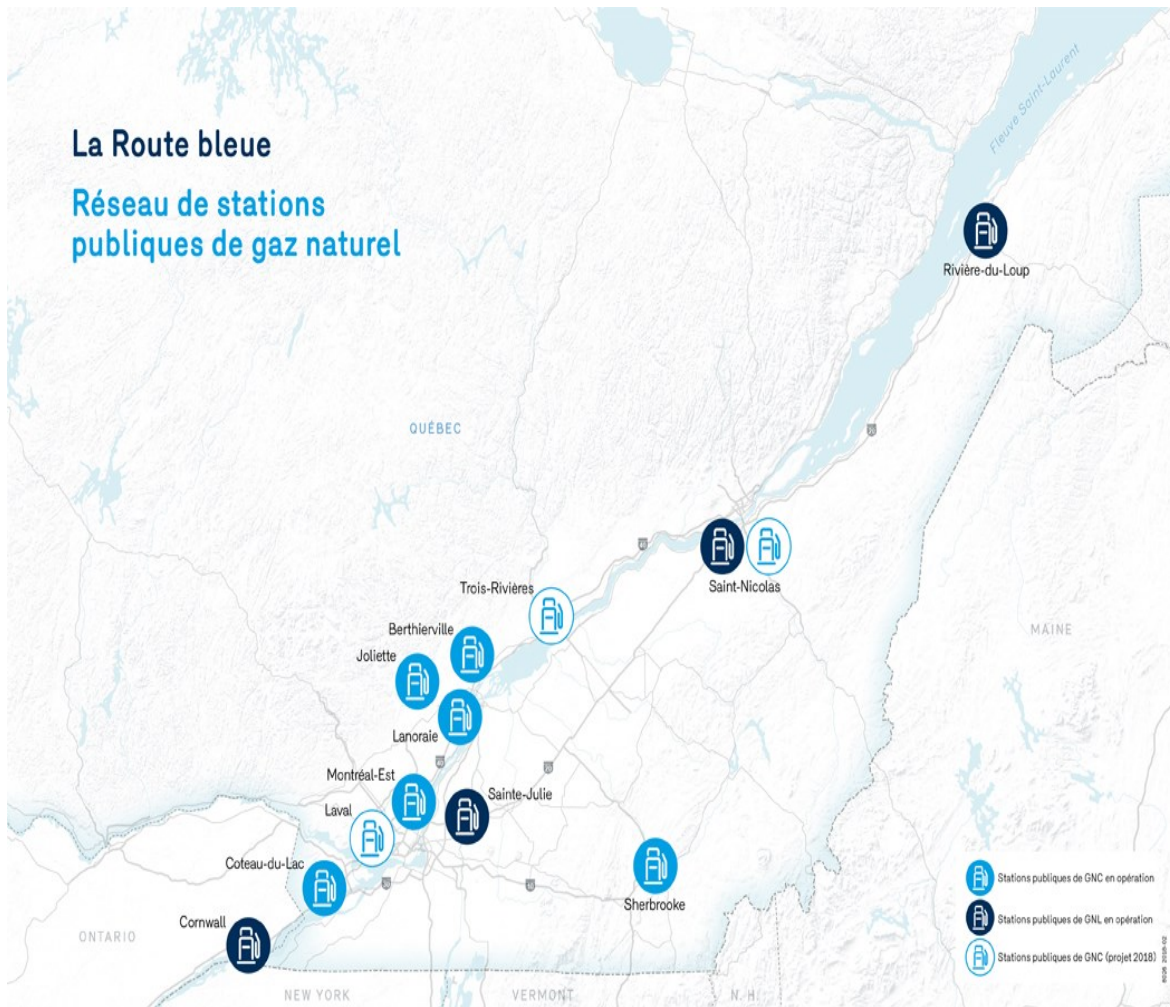
Le GNL est généralement utilisé dans le secteur du transport lourd terrestre (en remplacement du diesel dans les véhicules lourds ou camions), celui du transport maritime ainsi que « les installations industrielles et minières établies dans les régions éloignées, non desservies par le réseau gazier » (Énergir, 2017e). Il est recommandé spécifiquement pour le transport de lourdes charges réalisé sur de longues distances (Énergir, 2017f). Son utilisation permet de réduire les émissions de GES « dans une proportion allant jusqu'à 25 % par rapport au diesel et jusqu'à 32 % par rapport au mazout ». Par ailleurs, il permet également de réduire de 10 décibels le bruit environnemental (pollutions sonores) généré par les camions en plus de réduire presque totalement les émissions des polluants atmosphériques. (Énergir, 2017e)

- Gaz naturel comprimé (GNC)

Le GNC possède les mêmes propriétés que le gaz naturel à son état gazeux, mais se différencie par la haute pression de stockage de 24,8 MPa au niveau des stations de ravitaillement. En 2017, le Québec dénombrait un total de 19 stations de ravitaillement (privées et publiques) de GNC. Ce carburant est recommandé, généralement, pour « les véhicules moyens, légers ou lourds à court rayon quotidien [qui viennent] s'approvisionner pour une autonomie allant jusqu'à 1000 km par plein ». (Énergir, 2017h)

Plusieurs infrastructures (publiques et privées) de distribution de GNL et GNC sont présentes au Québec. Les infrastructures publiques en exploitation, au nombre de 10, dont trois de GNL et sept de GNC, sont localisées le long de la Route bleue, sur l'axe routier A-20/H-401, qui relie la région de Québec et celle de

Toronto (Énergir, 2017g). La figure 2.1 présente un aperçu du réseau de stations publiques de gaz naturel (GNL et GNC) de la Route bleue.



**Figure 2.1 Réseau de stations publiques de GNL et GNC sur la Route bleue** (tiré de : Énergir, 2017g).

Enfin, il faut relever que le secteur du transport routier au Québec compte environ 700 véhicules fonctionnant au gaz naturel (Énergir, 2018).



### 3. UTILISATION DE L'HYDROGÈNE DANS LE MONDE

Ce chapitre présente des exemples de pays qui ont, dans le cadre de l'orientation stratégique de leur politique énergétique, opté pour le choix de l'hydrogène comme vecteur énergétique dans le secteur du transport. Ainsi, la situation actuelle et projetée de l'usage de l'hydrogène, dans ces pays, sera abordée ainsi que les cadres réglementaires appliqués.

#### 3.1 Cas de l'Europe

La filière hydrogène en Europe bénéficie d'un large soutien de la part de la Commission européenne (CE), qui la considère comme un élément significatif faisant partie des solutions aux problèmes actuels de pollution et des GES. Ainsi, depuis 2003, la CE appuie financièrement « la mise en place d'un partenariat public privé pour le développement de la filière hydrogène et des PAC ». Dans ce contexte, 470 millions d'euros avaient déjà été mobilisés en 2013 afin de soutenir les secteurs de la recherche et du développement de la filière hydrogène en Europe. (Services Techniques et Commerciaux Mij inc., 2013) Par ailleurs, dans le but de développer une stratégie commune en lien avec une mobilité à faibles émissions en ce qui concerne ses États membres, la CE a procédé, à travers sa directive 2014/94/UE, à la mise en place d'un cadre d'action commun concernant « les véhicules, les infrastructures, les réseaux électriques, les incitations économiques [...] à l'échelon européen, national, régional et local ». Cela a incité plusieurs États membres (14 au total, incluant la France et l'Allemagne) à intégrer dans leurs cadres d'action nationaux, la prise en compte d'objectifs et de mesures visant à faciliter le déploiement d'infrastructures de ravitaillement pour véhicules électriques à PAC fonctionnant à l'hydrogène. L'estimation des besoins en investissement dans les infrastructures de la filière hydrogène des États membres a été évaluée à environ 707 millions d'euros d'ici à 2025. Cet investissement permettra d'atteindre une part de marché, comprise entre 0,3 et 0,4 % du parc automobile total, pour les véhicules fonctionnant à l'hydrogène en 2025. À cet effet, il est prévu de construire un nombre total de stations de ravitaillement en hydrogène, compris entre 820 et 842, d'ici 2025 pour des besoins estimés de ravitaillement de 0,9 à 1,1 million de véhicules. (CE, 2017)

Par ailleurs, pour soutenir et promouvoir le développement d'infrastructures électriques alimentées à l'hydrogène en Europe, 10 pays européens (France, Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Islande, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni et Suède) ont également initié un projet de mobilité hydrogène dénommé « *Hydrogen Mobility Europe (H2ME)* » afin d'impulser la création d'un réseau d'infrastructures interrégionales de points de ravitaillement en hydrogène en Europe. Ce projet, subdivisé en deux volets (H2ME 1 et H2ME 2), a permis de regrouper les acteurs européens de la filière hydrogène (constructeurs automobiles, fournisseurs de stations de recharge d'hydrogène et représentants gouvernementaux) autour

d'une même table dans le but de concevoir des stratégies communes visant à faire des transports à hydrogène une réalité concrète dans leurs régions respectives. (Hydrogen Mobility Europe [H2ME], 2018) La solution de « clusters » ou « flottes captives » incluant de multiples clients autour d'une même zone préalablement définie et possédant une ou plusieurs stations de recharge hydrogène, a été retenue dans le cadre de ce projet afin « de démarrer le marché, avant un déploiement complet ». Elle consiste donc à déployer les véhicules et les stations-service à hydrogène dans les zones où l'expression de la demande est élevée afin d'optimiser une charge correcte au moment de l'ouverture des stations et ainsi « réduire le besoin d'investissement et le risque d'une station peu chargée ». (AFHYPAC, 2018a) Le volet 1 du projet H2ME (H2ME 1), amorcé en 2015 et couvrant la période 2015-2020, prévoit un investissement total de 70 millions d'euros, le déploiement de 49 stations-service et la mise en circulation de plus de 300 véhicules électriques à PAC en Europe (H2ME, 2018). Le second volet du projet H2ME (H2ME 2), couvrant la période 2016 – 2022, prévoit la réalisation d'un test de marché à grande échelle de déploiement des infrastructures de ravitaillement en hydrogène et de véhicules électriques à PAC en Europe ainsi que la démonstration des avantages liés à l'utilisation de la technologie des électrolyseurs dans les opérations de réseau (CE, 2018). Ainsi, un investissement total de 100 millions d'euros est prévu, ainsi que le déploiement de 20 stations-service et la mise en circulation de plus de 1100 véhicules électriques à PAC (H2ME, 2018).

### **3.1.1 Situation de la filière hydrogène en France**

La France produit environ 1 Mt d'hydrogène par an principalement utilisé dans le secteur industriel. Cette production se fait principalement à travers des technologies (oxydation partielle des hydrocarbures et vaporeformage du Gaz naturel) qui contribuent énormément aux émissions de GES pour environ 11 Mt eCO<sub>2</sub> par an, « ce qui représente 3 % des émissions de CO<sub>2</sub> en France et près de 26 % des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur industriel ». (Ministère de la Transition écologique et solidaire [MTES], 2018)

En 2015, la France comptabilisait 10 stations de recharge en hydrogène pour véhicules (Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies [CGEIET], 2016). Ce nombre a progressivement augmenté permettant d'atteindre un nombre total de 23 stations ouvertes en 2018 (comprenant 12 stations privées et 11 stations publiques), en plus de 5 stations en construction, pour un nombre total de 260 véhicules (AFHYPAC, 2018a). La figure 3.1 présente un exemple de station-service à hydrogène situé dans le département des Yvelines en France.



**Figure 3.1 Exemple de station-service à hydrogène** (tiré de : Les Échos, 2018, 4 avril).

Ainsi, dans le cadre de son plan d'action national, conformément à la directive 2014/94/UE relative au développement d'infrastructures pour carburants alternatifs, le ministère de la Transition écologique et solidaire de la France a élaboré un plan de déploiement de l'hydrogène sur l'ensemble du territoire national afin d'impulser le développement de la filière hydrogène en France. Ce plan, axé autour de trois points majeurs, comprend principalement : la création d'une filière industrielle décarbonée, le développement de nouvelles perspectives de stockage des énergies renouvelables pour les sites isolés et enfin la mise en place d'une solution zéro émission pour les transports. Pour ce faire, 100 millions d'Euros seront mobilisés dès 2019 afin de faciliter la mise en œuvre de ce plan. (Ministère de la Transition écologique et solidaire [MTES], 2018) Plusieurs mesures, en lien avec les trois points majeurs précédents, ont été prises afin de faciliter l'atteinte des objectifs spécifiques de ce plan :

- Création d'une filière industrielle décarbonée

Concernant le point en lien avec la création d'une filière industrielle décarbonée, les mesures suivantes ont été prises (MTES, 2018) :

- L'intégration d'objectifs spécifiques à l'hydrogène dans les usages industriels à travers l'atteinte de 10 % d'hydrogène décarboné industriel d'ici 2023 puis, entre 20 et 40 % d'ici 2028. Ceci en vue de verdir la production d'hydrogène en France, qui actuellement est issue à environ 95 % d'énergies fossiles;
- La mise en place dès 2020 d'un système de traçabilité de l'hydrogène en France;
- La mise en évidence de « l'impact environnemental de l'hydrogène dans la réglementation relative aux [GES], ce qui permettra de différencier l'hydrogène en fonction de son mode de production ».

- Nouvelles perspectives de stockage des énergies renouvelables pour les sites isolés

En ce qui concerne le point relatif au développement de nouvelles perspectives de stockage des énergies renouvelables pour les sites isolés, les mesures suivantes ont été prises (MTES, 2018) :

- L'installation de la technologie des électrolyseurs dans les territoires isolés afin de favoriser le stockage intersaisonnier des énergies renouvelables électriques intermittentes;
- L'expérimentation de l'usage de la technologie de stockage dénommée « power-to-gas » et la détermination des conditions techniques et économiques de sa vulgarisation. Cette technologie permet de stocker provisoirement l'électricité issue des énergies renouvelables (solaire, éolien et hydraulique) sous la forme d'hydrogène ou de méthane de synthèse (après combinaison avec du CO<sub>2</sub> capté dans l'industrie) dans le réseau des infrastructures gazières, grâce à l'usage de la technologie des électrolyseurs, par la suite ces gaz peuvent à nouveau être valorisés sous forme d'électricité ou de chaleur;
- L'identification des services écosystémiques rendus par les électrolyseurs afin de développer le modèle d'affaire de l'hydrogène.

- Solution zéro émission pour les transports

Concernant le point relatif à la solution zéro émission pour les transports, les mesures suivantes ont été prises (MTES, 2018) :

- Le déploiement « des écosystèmes territoriaux de mobilité hydrogène sur la base notamment de flottes de véhicules professionnels » comprenant 5000 véhicules utilitaires légers et 200 véhicules lourds en plus de la construction de 100 stations de ravitaillement en hydrogène, produit localement, d'ici 2023. À l'horizon 2028, les perspectives visées comprennent l'atteinte d'une flotte de 20 000 à 50 000 véhicules utilitaires légers et 800 à 2000 véhicules lourds à hydrogène en plus de la construction de 400 à 1000 stations de ravitaillement en hydrogène;
  - Le développement d'une gamme de véhicules lourds routiers;
  - Le lancement d'une mission parlementaire ayant pour objectif d'élaborer des propositions pour le verdissement du parc ferroviaire français, notamment le remplacement des locomotives les plus polluantes;
  - La mise en place d'un cadre réglementaire spécifique pour les stations-service distribuant de l'hydrogène;
  - La création d'un « centre international de qualification pour la certification de composants hydrogène haute pression pour la mobilité routière, [...] le maritime, le fluvial et le ferroviaire ».
- (MTES, 2018)

Il est important d'indiquer qu'à ce jour, le secteur de l'hydrogène emploie environ 2000 personnes en France. Selon les prévisions en lien avec le développement futur de la filière hydrogène en France, environ « 8,5 millions d'euros de chiffre d'affaires [est prévu] en 2030 contre 40 millions d'euros en 2050 [avec] plus de 40 000 emplois [prévus] dans le secteur en 2030 et plus de 150 000 emplois en 2050 ». De plus, une baisse substantielle des émissions de CO<sub>2</sub> est prévue, du fait de l'usage de l'hydrogène dans le transport, de 10 à 12 Mt eCO<sub>2</sub> à l'horizon 2030 et de 55 Mt eCO<sub>2</sub> à l'horizon 2050. (MTES, 2018)

### **3.1.2 Situation de la filière hydrogène en Allemagne**

La filière hydrogène allemande bénéficie d'un soutien important de la part du Gouvernement fédéral à travers des investissements dans les secteurs de la recherche et le développement, des PAC, du déploiement des infrastructures et les partenariats publics et privés. Ainsi, entre 2000 et 2003, un investissement de 10 millions d'euros a été consacré au développement d'infrastructures d'approvisionnement en hydrogène pour des autobus à PAC, en plus de 50 et 120 millions d'euros respectivement alloués aux centres de recherche et aux partenariats publics-privés en lien avec le secteur de la filière hydrogène. (Services Techniques et Commerciaux Mij inc., 2013) En 2007, le Gouvernement fédéral a créé le programme national d'innovation hydrogène et piles à combustible (PNIHPC), dans le cadre de la stratégie fédérale pour les carburants alternatifs. L'objectif de ce programme est de contribuer à « l'accélération de la préparation du marché allemand pour les applications des PAC et de l'hydrogène, afin d'arriver dans les meilleurs délais à commercialiser et à industrialiser ces produits ». (Science Allemagne, 2009) Dans ce contexte, un accent particulier a été porté sur les domaines du transport et infrastructure de l'hydrogène, l'approvisionnement en énergie stationnaire et les marchés spéciaux. De façon pratique, la stratégie utilisée a consisté à regrouper les projets individuels, en lien avec la filière hydrogène, selon des thématiques ou suivant des régions, ce qui a favorisé la création de plusieurs « clusters de projets, permettant, d'une part, la réalisation de larges projets de démonstration plus proches de l'utilisation quotidienne et, d'autre part, une meilleure visibilité [...] des partenaires ». (Science Allemagne, 2009) De plus, pour coordonner les actions de ce programme au plan national, le Gouvernement fédéral allemand, en 2008, a créé « l'Organisation nationale dédiée aux technologies des piles à combustible et de l'hydrogène » en charge d'évaluer les projets de démonstration proposés par les différents acteurs de la filière hydrogène et de faciliter la mise en relation de ces projets avec les activités en lien avec les secteurs de la recherche et le développement. Cette organisation, jouant le rôle d'interface entre le Gouvernement fédéral, l'industrie et la recherche, permet en quelque sorte de créer une plateforme intégrée favorisant la valorisation des qualités des différents acteurs de la filière hydrogène (composés des entreprises multinationales de l'industrie automobile, de l'énergie et des hydrocarbures, les transports publics, les organismes scientifiques spécialisés et le Gouvernement fédéral). Ainsi, en 2009, ce sont au

total 170 projets de démonstration représentant un budget total de 663 millions d’euros qui ont été évalués par l’Organisation nationale dédiée aux technologies des piles à combustible et de l’hydrogène. (Science Allemagne, 2009) Le PNIHPC, doté d’un budget de 1,4 milliard d’euros sur la période 2007 – 2016, a permis d’accroître «le nombre de stations-service à hydrogène de 15 en 2013 à 100 en 2017» (AFHYPAC, 2018b). De plus, grâce au PNIHPC, l’Allemagne a pu mettre en circulation, depuis l’automne 2018, deux trains électriques à PAC fonctionnant à l’hydrogène en vue du remplacement progressif de la flotte actuelle utilisant le diesel (AFHYPAC, 2018c). Par ailleurs, dans le cadre du projet *Hydrogen Mobility Europe* (H2ME), l’Allemagne «prévoit l’implantation de 400 stations-service d’ici 2023» (AFHYPAC, 2018b). La figure 3.2 présente un aperçu du réseau de stations-service de ravitaillement en hydrogène actuel et projeté de l’Allemagne.



**Figure 3.2 Localisation des stations-service en Allemagne** (tiré de : AFHYPAC, 2018b, p. 3).

Le Gouvernement fédéral, à travers le PNIHPC, prévoit allouer un investissement de 250 millions d’euros d’ici la fin 2019 afin de soutenir à la fois la recherche et le développement en lien avec les technologies de la filière hydrogène ainsi que leur élargissement aux domaines ferroviaire et marin. De plus, un investissement de 25 millions d’euros par an, jusqu’à l’horizon 2026, sera consacré à la recherche et au développement afin de soutenir le déploiement des infrastructures de véhicules à PAC. (AFHYPAC, 2018b ; Sénat, 2018)



### 3.2 Cas des États-Unis

Le développement de la filière hydrogène américaine a été amorcé dans le courant des années 1992, par l'intermédiaire d'une décision stratégique prise par le Gouvernement américain d'investir largement dans les programmes de recherche et développement des technologies de l'hydrogène et des PAC afin de surmonter les obstacles technologiques, économiques et institutionnels à leur commercialisation. Cette décision a été prise afin d'améliorer la performance énergétique du parc automobile américain et ainsi répondre à la fois aux problématiques de raréfaction des énergies fossiles et du changement climatique. La matérialisation de cet engagement s'est faite par le programme « *hydrogen fuel initiative* », initié en 2003 par le gouvernement américain qui l'a « doté de 1,2 milliard de dollars sur 5 ans, afin de parvenir à la commercialisation, à compter de 2020, de véhicules propulsés par PAC ». La figure 3.3 présente la feuille de route du développement de la filière hydrogène américaine, subdivisée en quatre phases principales comprenant la phase de développement des technologies des PAC, la phase de pénétration initiale du marché, la phase d'investissement dans les infrastructures et la phase de déploiement régional du réseau d'infrastructure et du développement total du marché. (Jamet, 2006)

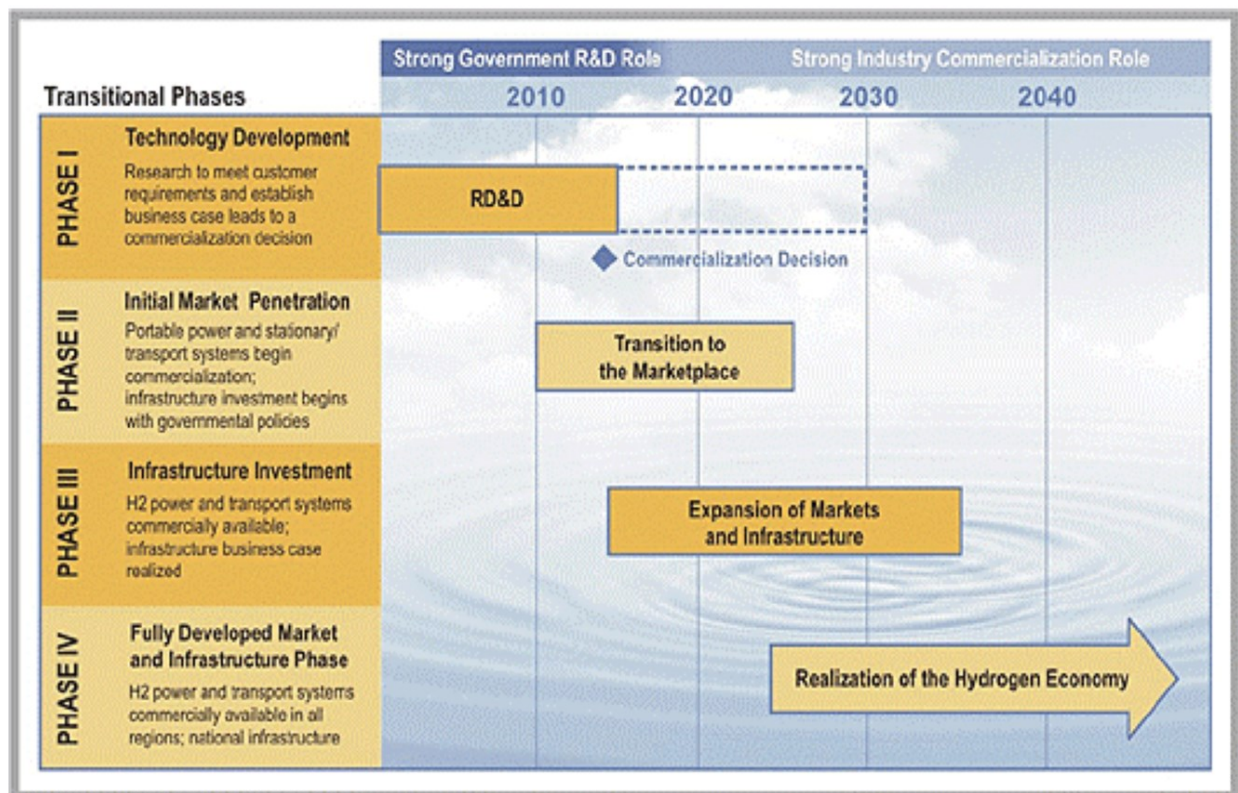


Figure 3.3 Feuille de route du développement du programme « *hydrogen fuel initiative* » (tiré de : Jamet, 2006, p.10).

Selon les prévisions de la première phase de ce programme, les objectifs ciblés de commercialisation des technologies de production de l'hydrogène et des PAC devraient être amorcés en 2015 (Jamet, 2006). Il est bon de préciser que le programme « *hydrogen fuel initiative* », est piloté par le Département de l'énergie (*Department of Energy*) et a pour objectif de financer les activités de recherche et développement en lien avec des domaines spécifiques de la filière hydrogène. Ces domaines comprennent principalement : les modes de production, distribution et stockage de l'hydrogène, les technologies des PAC ainsi que leur fabrication et industrialisation, la validation des différentes technologies, la sécurité ainsi que les normes et le cadre réglementaire, les analyses de systèmes et enfin les études de marché. (AFHYPAC, 2016b) Le budget des investissements de la recherche en lien avec les technologies de l'hydrogène est ainsi passé de 156 millions de dollars en 2006 à 196 millions de dollars en 2007 (Jamet, 2006). Par la suite, il a augmenté à une valeur d'environ 200 millions de dollars par an entre 2008 et 2009 « puis diminué jusqu'à des valeurs de 90 à 100 millions de dollars pour les années 2015 – 2016 » (AFHYPAC, 2016b). Les investissements antérieurs dans les projets de recherche ont permis de réduire de 50 % le coût des PAC embarqués dans les véhicules, entre 2002 et 2005, passant ainsi de 275 \$/kW à 110 \$/kW avec un seuil de compétitivité estimé à 40 \$/kW (Jamet, 2006).

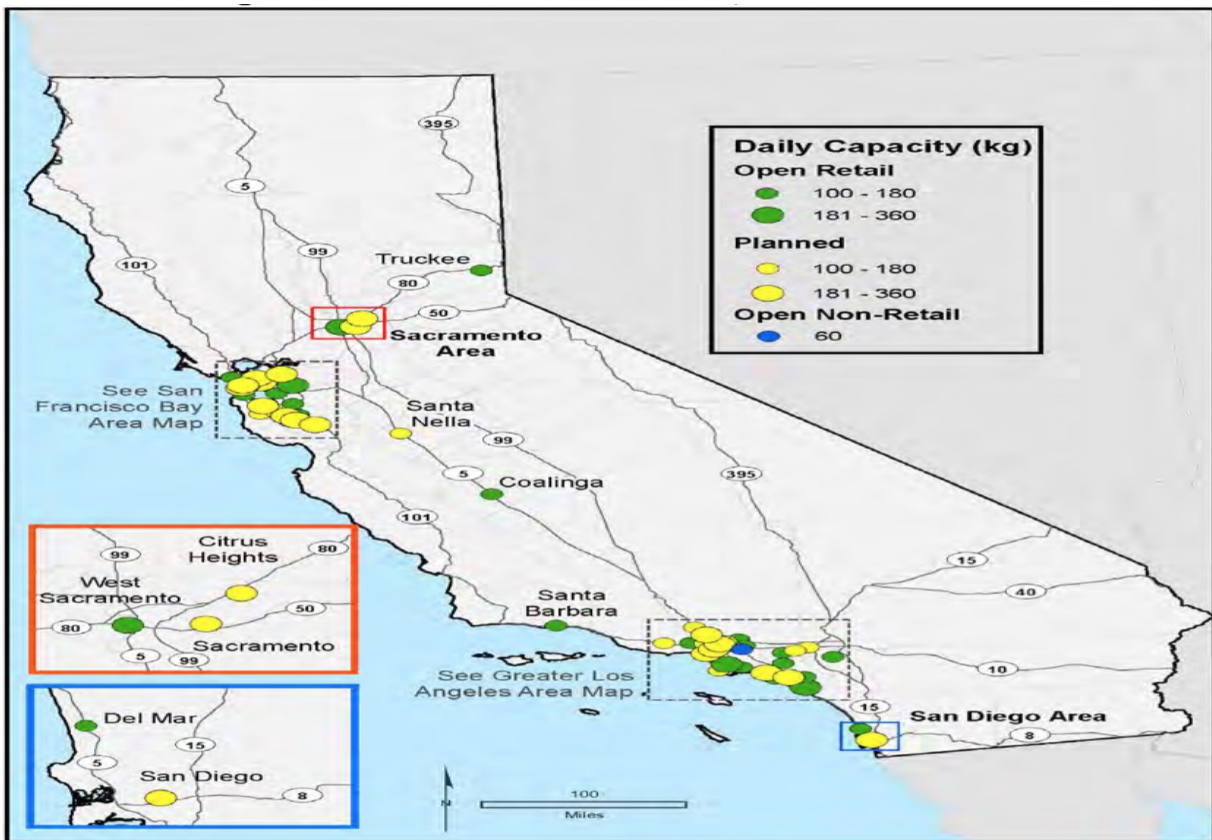
Parallèlement aux actions du gouvernement américain, plusieurs segments de marché en lien avec le développement de la filière hydrogène se sont développés dans plusieurs États américains, au nombre desquels figurent la Floride, le Texas et la Californie. Afin de mieux illustrer la stratégie adoptée dans ces États, l'accent sera mis sur le modèle du développement de la filière hydrogène dans l'État de la Californie, qui se présente comme le chef de file dans le secteur du déploiement d'infrastructures de ravitaillement en hydrogène et de l'usage des véhicules électriques à PAC.

- Exemple de la Californie

Les initiatives de l'État de la Californie en faveur du développement de la filière hydrogène ont été amorcées en 1999 par la création du partenariat californien sur les piles à combustible (*California Fuel Cell Partnership ou CaFCP*). Ainsi, le CaFCP, dont la mission était de « faciliter la commercialisation des PAC pour les transports », regroupait plusieurs acteurs, dont le département américain de l'Énergie, le département américain des Transports, les agences californiennes (*California Air Resources Board* et *California Energy Commission*), les constructeurs de véhicules automobiles et les sociétés intervenant dans la fabrication des PAC. À la suite des retombées positives de ce partenariat, grâce auquel plusieurs douzaines de véhicules électriques à PAC ont vu le jour entre 2000 et 2003, le gouverneur de l'État de la Californie de l'époque, M. Arnold Schwarzenegger, initia en 2004 la réalisation d'un projet majeur de déploiement d'un réseau de station-service de ravitaillement en hydrogène en Californie, dénommé

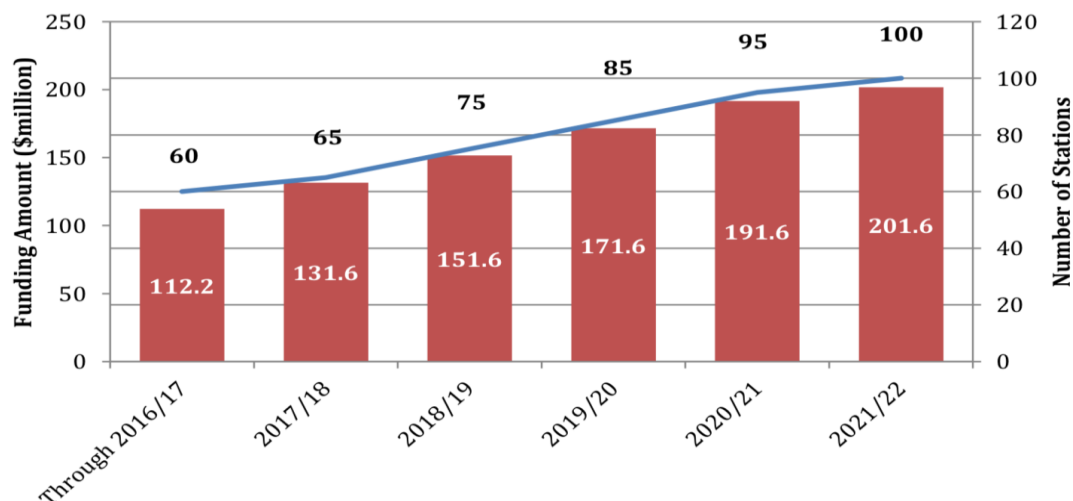


« Autoroute de l'hydrogène (*California Hydrogen Highway*) ». (Bento, 2010) Ce projet visait l'objectif d'atteindre un total de 100 stations de distribution d'hydrogène à l'horizon 2010. Cependant en 2017, la Californie dénombrait un total de 65 stations de distribution d'hydrogène délivrant une capacité totale de 14 875 kg d'hydrogène par jour pouvant alimenter plus de 21 000 véhicules électriques à PAC. (*California Energy Commission* [CEC], 2017) La figure 3.4 présente un aperçu du réseau de stations-service de ravitaillement en hydrogène actuel et projeté de la Californie.



**Figure 3.4 Réseau de stations-service de ravitaillement en hydrogène de la Californie** (tiré de : CEC, 2017, p.10).

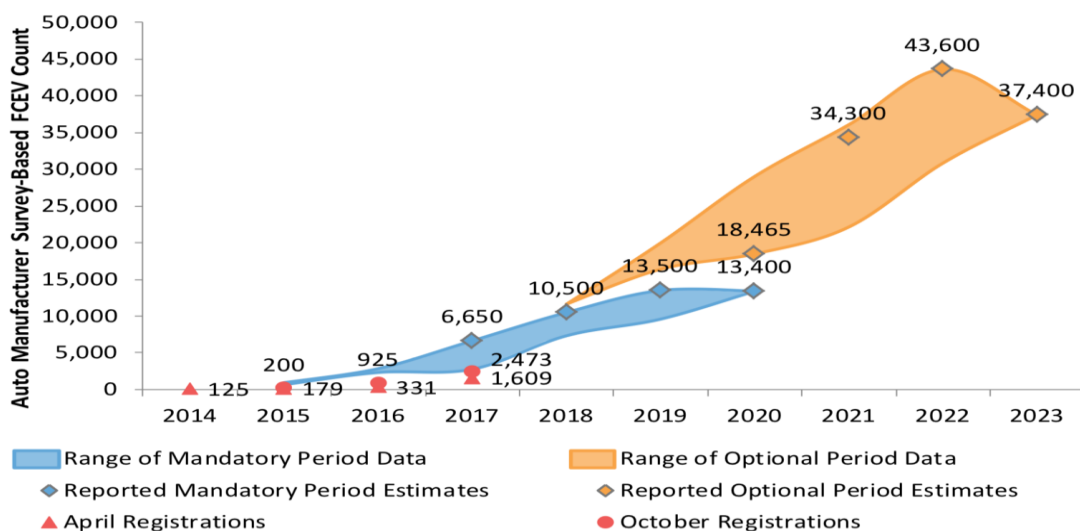
Ces stations sont majoritairement localisées dans deux zones géographiques distinctes : au nord dans la région de la baie de San Francisco, qui regroupe un total de 25 stations-service pour une capacité journalière de 7100 kg d'hydrogène, et au sud dans la région métropolitaine de Los Angeles, qui regroupe 35 stations-service d'une capacité journalière de 7010 kg d'hydrogène. Ces deux zones sont interconnectées par cinq stations-service d'une capacité journalière de 765 kg d'hydrogène. Le déploiement de ces infrastructures a nécessité un investissement total cumulé de 131,6 millions de dollars en 2017. (CEC, 2017) La figure 3.5 présente la mise à jour du plan de financement du déploiement des 100 stations-service du projet Autoroute de l'hydrogène en Californie.



**Figure 3.5 Plan de financement des stations-service de la Californie** (tiré de : CEC, 2017, p.4).

Selon ce tableau, la date prévue pour la finalisation des 35 stations-service restantes (afin d'atteindre l'objectif initial de 100 stations-service) a été estimée à 2021 pour un investissement résiduel total de 70 millions de dollars. Les 100 stations-service nécessiteront un investissement total cumulé de 201,6 millions de dollars à la fin du projet. (CEC, 2017)

Il est intéressant d'indiquer qu'en octobre 2017, la Californie comptabilisait au total 2473 véhicules électriques à PAC en circulation sur son territoire contre 925 véhicules au cours de la même période en 2016, ce qui représente une hausse significative d'environ 170 % traduisant des perspectives optimistes pour ce marché. Par ailleurs, il est prévu en 2020 et 2023 respectivement un total de 13 400 et 37 400 véhicules électriques à PAC sur le territoire californien. (CEC, 2017) La figure 3.6 présente le nombre total actuel et projeté de véhicules électriques à PAC en circulation sur le territoire californien.



**Figure 3.6 Nombre de véhicules électriques à PAC en Californie** (tiré de : CEC, 2017, p.23).

### 3.3 Cas du Japon

Les initiatives du gouvernement japonais en faveur du développement de la filière hydrogène ont été amorcées en 1993, à la suite de la création du programme « *World Energy Network* » qui avait pour but « la planification et la mise en place de la recherche et développement pour les technologies de l'hydrogène » par la collaboration des différents acteurs de la filière hydrogène (gouvernement, industries et instituts de recherche). Ce programme, qui couvrait la période 1993 – 2002, a nécessité un investissement total de 200 millions de dollars orienté selon deux axes majeurs : le premier concerne la recherche et le développement en lien avec les technologies de l'hydrogène et des PAC ainsi que la mise en place d'une vision nationale de la filière hydrogène (sur la période 1993-1998); par la suite, la démonstration des technologies et des infrastructures (sur la période 1999-2002). À la suite de ce programme, un partenariat public-privé dénommé « *Joint Fuel Cell Hydrogen (JHFC)* » a été mis en place en 2002 afin de faciliter l'expérimentation du déploiement d'infrastructures d'approvisionnement en hydrogène ainsi que la mise en circulation de véhicules électriques à PAC au Japon. (Bento, 2010)

La stratégie actuelle du gouvernement japonais est de faire du Japon « une société à hydrogène avec pour première échéance les Jeux olympiques de 2020 ». Ainsi, une feuille de route, avec quatre objectifs majeurs, a été mise en place en 2014 par le ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie japonais « *Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)* » afin d'amorcer le projet de réalisation de la société hydrogène. Les objectifs escomptés comprennent principalement : la hausse de l'efficacité énergétique ainsi que la maîtrise de l'énergie, « l'amélioration de la sécurité et de l'indépendance énergétique, la réduction des GES [et enfin] le développement des activités industrielles dans la filière hydrogène ». (Ministère de l'Économie et des Finances [MEF], 2017)

Un plan de déploiement des technologies de l'hydrogène sur le territoire japonais à l'horizon 2040 a donc été élaboré en 2016 par le METI dans le cadre du projet de réalisation de la société hydrogène. Ce plan s'articule autour de trois phases principales : la première phase, qui couvre la période 2017-2030, permettra de « généraliser et diffuser l'utilisation des véhicules hydrogène, des stations à hydrogène et des PAC ». La deuxième phase de ce plan, qui s'étend sur la période fin 2020 à 2030/2040, permettra de développer et « promouvoir au maximum la production d'hydrogène et établir un système d'approvisionnement en hydrogène à grande échelle en 2030 ». La dernière phase, prévue autour de 2040, permettra de « définir un système d'approvisionnement en hydrogène décarboné ». Ainsi, il est prévu dans le cadre de la mobilité hydrogène associée au projet de la société hydrogène, le déploiement de 160 stations à hydrogène en 2020 et 320 en 2025 au Japon. De plus, il est prévu de mettre en circulation sur le territoire japonais respectivement un total de 40 000 véhicules électriques à PAC d'ici 2020, 200 000 d'ici 2025 et 800 000 d'ici 2030. (MEF, 2017)

En 2017, le Japon dénombrait un total de 90 stations et 2300 véhicules sur son territoire (MEF, 2107). Ce nombre a légèrement augmenté en 2018 pour atteindre au total 101 stations-service et 2400 véhicules électriques à PAC (MEF, 2018). Ainsi, le gouvernement japonais a pris une série de mesures dans le but de favoriser l'atteinte des objectifs fixés par le METI, dans le cadre du projet de réalisation de la société hydrogène. Ces mesures concernent la subvention des projets de construction de stations-service initiés par le secteur privé à hauteur de 50 % du coût de réalisation des stations ainsi que le versement d'une allocation sur une durée de 5 ans pour couvrir les charges de gestion et d'opération de la station. En contrepartie, le gouvernement exige que « l'exploitant de la station s'engage à ce que les tarifs soient à la parité avec l'essence ». (MEF, 2017) Par ailleurs, le gouvernement encourage et privilégie la création de consortiums regroupant plusieurs acteurs de la filière hydrogène afin de valoriser l'expertise de chaque acteur au niveau de chaque projet. C'est le cas par exemple du consortium créé en 2018 dénommé « *Japan H2 Mobility LLC* », qui regroupe des industriels de l'automobile (Toyota Motor Corp., Nissan Moto Co. et Honda Motor Co.), des compagnies du secteur énergétique japonais (JXTG Nippon Oil et Energy Corp., Idemitsu Kosan Co., Iwatani Corp., Tokyo Gas Co., Toho Gas Co., et air Liquide Japan) et la Banque de Développement du Japon, dont l'objectif est de « promouvoir la construction de stations hydrogène et de stimuler la demande adressée aux véhicules à PAC ». Ainsi, l'entreprise « *Japan H2 Mobility LLC* » prévoit la construction de « 80 stations à hydrogène entre 2018 et 2021 dans les zones métropolitaines principales, avant de s'étendre dans le reste du pays. (MEF, 2018)

Enfin, il est important d'indiquer que le rôle actif du Japon pour l'hydrogène s'explique du fait de la forte dépendance énergétique du pays aux énergies fossiles (94 %), totalement importées de l'extérieur et dont 98 % sont utilisées comme carburant dans le secteur du transport, et également à cause des engagements pris par le gouvernement japonais en faveur de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 26 % en 2030, par rapport au niveau de 2013. (METI, 2017)

### **3.4 Cadres réglementaires**

Plusieurs approches réglementaires et normatives en lien avec l'usage de l'hydrogène, la technologie des électrolyseurs ainsi que le stockage d'hydrogène et les PAC existent dans plusieurs pays du monde. Les normes observées sont principalement internationales et se réfèrent en général à l'Organisation internationale de normalisation « *International Organization for Standardization (ISO)* ». Cependant certaines normes existent au niveau européen (EN) ou français (NF). (Institut national de l'environnement industriel et des risques [INERIS], 2016)

- **Normalisation relative à l'hydrogène**

La normalisation relative à l'hydrogène a fait l'objet de réflexion au sein d'un comité technique dénommé « ISO TC 197 : Technologies de l'hydrogène », qui a été créé en 1990. L'ISO TC 197 a pour objectif « d'élaborer des normes dans le domaine des systèmes et dispositifs de production, de stockage, de transport, de mesurage et d'utilisation de l'hydrogène ». (AFHYPAC, 2016c) À ce jour, ce comité a publié 19 normes ISO et prépare actuellement 10 projets de normes ISO en lien avec l'hydrogène (ISO, s. d.). Ces normes sont relatives : à la sécurité des systèmes à hydrogène, au stockage d'hydrogène sous forme de gaz sous pression, au stockage d'hydrogène sous forme d'hydrure et à la technologie de l'électrolyse (INERIS, 2016). Le tableau 3.1 présente quelques normes publiées ou révisées par le comité ISO TC 197.

**Tableau 3.1 Quelques normes publiées par l'ISO TC 197** (compilé de : INERIS, 2016; ISO, s. d.).

Norme	Nom de la norme
ISO 16110-2:2010	Générateurs d'hydrogène faisant appel aux technologies du traitement du carburant – Partie 2 : Méthodes d'essai de rendement
ISO 16110-1:2007	Générateurs d'hydrogène faisant appel aux technologies du traitement du carburant – Partie 1 : Sécurité
ISO/TR 15916:2015	Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à l'hydrogène
ISO 22734-1:2008	Générateur d'hydrogène utilisant le procédé d'électrolyse de l'eau – Partie 1 : Applications industrielles et commerciales
ISO 22734-1:2011	Générateur d'hydrogène utilisant le procédé d'électrolyse de l'eau – Partie 2 : Application pour les habitations
ISO/DIS 19884	Hydrogène gazeux – Bouteilles et tubes pour stockage stationnaire
ISO 16111:2008	Appareils de stockage de gaz transportables – Hydrogène absorbé dans un hydrure métallique réversible
ISO 14687-2:2012	Spécification de produit – Partie 2 : Applications des piles à combustible à membrane à échange de protons (MEP) pour les véhicules routiers
ISO/TS 19880-1:2016	Carburant d'hydrogène gazeux – Stations-service – Partie 1 : Exigences générales
ISO/TS 19880-3:2018	Carburant d'hydrogène gazeux – Stations-service – Partie 3 : Vannes
ISO 16528-1:2007	Chaudières et récipients sous pression – Partie 1 : Exigence de performance
NF EN ISO 4126-1:2013	Dispositifs de sécurité pour protection contre les pressions excessives – Partie 1 : Soupapes de sûreté
NF EN ISO 4126-2:2013	Dispositifs de sécurité pour protection contre les pressions excessives – Partie 2 : Dispositifs de sûreté à disque de rupture

En plus des normes publiées par le comité technique ISO TC 197, quelques normes relatives à l'hydrogène sont également publiées au niveau européen et français. C'est le cas par exemple des normes NF EN 13445-3:2014 et NF EN 13445-5:2014, relatives respectivement à la conception et à l'inspection des récipients sous pression non soumis à une flamme. De plus, la France a publié en 2013 la norme NF M58-003 (Installation des systèmes mettant en œuvre l'hydrogène), qui se présente sous la forme d'un guide, qui vise principalement toutes les installations en lien avec l'hydrogène gazeux. Cependant, cette

norme ne s'applique pas aux « installations industrielles qui produisent ou utilisent, en continu, des débits massiques excédant 400 Nm<sup>3</sup>/h » ainsi qu'à l'usage de l'hydrogène comme charge d'alimentation et intrant des processus de production des raffineries de pétrole et des usines chimiques. (INERIS, 2016)

- Normalisation relative aux piles à combustible

La normalisation relative aux piles à combustible a également fait l'objet de réflexion au sein d'un comité technique dénommé « IEC TC 105 : Technologies des piles à combustible », de la Commission électrotechnique internationale « *International Electrotechnical Commission* (IEC) », comité créé en 1996. L'IEC TC 105 a pour objectif « d'élaborer des normes dans le domaine des technologies de PAC pour les applications stationnaires et mobiles ». (AFHYPAC, 2016c) L'IEC TC 105 a publié, depuis sa création, plusieurs normes en lien avec les technologies des PAC. Le tableau 3.2 présente quelques normes publiées par l'IEC TC 105.

**Tableau 3.2 Quelques normes publiées par l'IEC TC 105** (compilé de : AFHYPAC, 2016c; IEC, 2018).

Norme	Nom de la norme
IEC TS 62282-1 (2013-03)	Technologies des piles à combustible – Partie 1 : Terminologie
IEC 62282-2 (2007-03)	Technologies des piles à combustible – Partie 2 : Modules à piles à combustible
IEC 62282-3-100 (2007-04)	Technologies des piles à combustible – Partie 3-100 : Système à PAC stationnaires – Sécurité
IEC 62282-3-200 (2011-01)	Technologies des piles à combustible – Partie 3-200 : Système à PAC stationnaires – Méthodes d'essai des performances
IEC 62282-3-3 (2007-01)	Technologies des piles à combustible – Partie 3-3 : Système à PAC stationnaires – Sécurité
IEC 62282-5-1 (2007-02)	Technologies des piles à combustible – Partie 5-1 : Système à PAC stationnaires – Sécurité
IEC 62282-6-200 (2016-03)	Technologies des piles à combustible – Partie 6-200 : Système à micropiles à combustible – Méthodes d'essai des performances
IEC 62282-6-100 (2010)	Technologies des piles à combustible – Partie 6-100 : Système à micropiles à combustible – Sécurité

- Règlementation européenne

La réglementation européenne se présente comme un exemple de directives, auxquelles sont assujettis les États membres de l'Union européenne (UE), qui exigent de la part des concepteurs ainsi que des exploitants d'électrolyseurs et stockage d'hydrogène le respect de la conformité des mesures génériques élaborées au niveau européen. Ces directives sont généralement non « spécifiques aux installations [qui mettent] en œuvre de l'hydrogène », mais permettent néanmoins d'élaborer des normes générales au niveau de chaque État membre de l'UE, qui intègrent l'essentiel des exigences des directives européennes. (INERIS, 2016) Le tableau 3.3 présente la liste de quelques directives européennes qui permettent d'harmoniser les législations, en lien avec les technologies de la filière hydrogène, au niveau des États membres de l'UE.

**Tableau 3.3 Liste de quelques directives européennes** (modifié de : INERIS, 2016, p.65).

Directive	Description de la directive
2014/68/UE	Directive 2014/68/UE du 15 mai 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché des équipements sous pression.
2014/34/UE	Directive 2014/34/UE du 26 février 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosives.
2012/18/UE	Directive 2012/18/UE du 4 juillet 2012 dite directive « Seveso 3 » concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses, modifiant puis abrogeant la directive 96/82/CE du Conseil.
2010/75/UE	Directive 2010/75/UE du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution).
2010/35/UE	Directive 2010/35/UE du 16 juin 2010 relative aux équipements sous pression transportables.
2009/142/CE	Directive 2009/142/CE du 20 novembre 2009 concernant les appareils à gaz.
2008/68/CE	Directive 2008/68/CE du 24 septembre 2008 au transport intérieur des marchandises dangereuses.
2006/95/CE	Directive 2006/195/CE du 12 décembre 2006 concernant le rapprochement des législations des États membres relatives au matériel électrique destiné à être employé dans certaines limites de tension.
2006/42/CE	Directive 2006/42/CE du 17 mai 2006 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE.
2004/108/CE	Directive 2004/108/CE du 15 décembre 2004 relative au rapprochement des législations des États membres concernant la compatibilité électromagnétique et abrogeant la directive 89/336/CEE
1999/92/CE	Directive 199/92/CE du 16 décembre 1999 concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives.

En plus des directives européennes, l'organisme dénommé Association européenne des industriels du gaz « *European Industrial Gas Association (EIGA)* » élabore des guides qui présentent « les recommandations de la profession concernant la production, la manipulation et le transport de l'hydrogène dans l'industrie » (INERIS, 2016). Le tableau 3.4 présente le résumé des guides, en lien avec la filière hydrogène, publiés par l'EIGA.

**Tableau 3.4 Liste de quelques guides publiés par l'EIGA** (modifié de : INERIS, 2016, p.66).

Guide	Nom du guide	Description du guide
Doc. 121/14/2014	<i>Hydrogen Pipeline Systems</i>	Fournie des conseils sur la conception et le maintien des systèmes de transport et distribution d'hydrogène pur ou en mélange. Il n'a pas vocation à être obligatoire et contient un résumé des mesures mises en place par les industriels. Basé sur les connaissances et le retour d'expérience des producteurs en Europe et Amérique du Nord.
Doc. 171/12/2012	<i>Storage of Hydrogen in Systems Located Underground</i>	Présente les exigences spécifiques au stockage de l'hydrogène souterrain.
Doc. 122/11/2011	<i>Environmental Impacts of Hydrogen Plants</i>	Facilite la mise en place d'un système de gestion de la sécurité pour les entreprises produisant de l'hydrogène.
Doc. 100/11/2011	<i>Hydrogen Cylinders and Transport Vessels</i>	Présente les retours d'expériences en lien avec le stockage d'hydrogène par compression ainsi que certaines recommandations pour la spécification, la fabrication, les essais, l'entretien et le montage des réservoirs et bouteilles.

- Règlements français

La réglementation française actuellement utilisée découle de deux directives européennes principales : la directive 2012/18/UE, dénommée « SEVESO 3 », qui couvre la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses et la directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles, dénommée « IED » (Commissariat à l'Énergie atomique et aux Énergies alternatives [CEA], 2018). Ces deux directives sont actuellement intégrées dans la réglementation française relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), à travers les rubriques ICPE 4715 et ICPE 3420, car l'hydrogène est considéré comme « une substance de base de l'industrie chimique, produite et manipulée en milieu industriel par des acteurs formés aux risques associés » (ADEME, 2015).

La rubrique ICPE 4715, qui découle de la transposition de la directive SEVESO 3, traite principalement des aspects relatifs aux risques en lien avec « la production, l'utilisation et le stockage d'hydrogène » (CEA, 2018). Ainsi, les deux régimes de classement, en l'occurrence « l'autorisation et la déclaration », seront appliqués en fonction du tonnage d'hydrogène susceptible d'être présent dans l'installation. De ce fait, le régime d'autorisation est appliqué lorsque « la quantité d'hydrogène susceptible présente dans l'installation est supérieure ou égale à 1 tonne ». À l'opposé, le régime de déclaration est appliqué lorsque « la quantité d'hydrogène présente dans l'installation est supérieure ou égale à 100 kg, mais inférieure à 1 tonne ». Par ailleurs, pour des quantités d'hydrogène inférieures à 100 kg, « l'entreprise n'est pas soumise à la législation des ICPE et n'a pas de démarche à effectuer en relation avec le code de l'environnement ». La rubrique ICPE 3420, qui elle découle de la transposition de la directive IDE, fait référence à la « fabrication en quantité industrielle par transformation chimique ou biologique de produits chimiques inorganiques ». Ainsi, les entreprises concernées sont directement soumises au régime d'autorisation dès la production de la première molécule d'hydrogène. (ADEME, 2015)

Enfin, il est bon de mentionner que « la procédure de demande d'une autorisation environnementale, prise notamment au titre de la législation ICPE, est précisée dans le code de l'environnement [de la France] » (CEA, 2018). Ainsi, il est de la responsabilité du demandeur de l'autorisation de démontrer par « une étude d'impacts et une étude de dangers » que le projet pour lequel il sollicite une demande d'autorisation est conforme avec la réglementation en vigueur. L'autorité responsable de la délivrance de l'autorisation environnementale est le Préfet après « instruction par les services administratifs, enquête publique et passage devant le Conseil départemental de l'environnement et des risques sanitaires et technologiques ». En ce qui concerne le régime de la déclaration, « la procédure se limite à une déclaration à réaliser à la préfecture ou en ligne, avant la mise en service du projet ». Le responsable de l'installation qui soumet la déclaration doit « également vérifier que son projet est conforme aux prescriptions générales définies par arrêté ministériel ». (CEA, 2018)



- Règlementation américaine

La réglementation américaine de la filière hydrogène est encadrée par plusieurs organisations qui élaborent des règlements, des codes et des normes. Ces organisations comprennent : l'Association nationale de l'hydrogène « *National Hydrogen Association* (NHA) », la Société des ingénieurs automobiles « *Society of Automotive Engineers* (SAE), l'Association des gaz comprimés « *Compressed Gas Association* (CGA) », les Laboratoires des assureurs « *Underwriters Laboratories* (UL) », l'Association nationale de protection contre les incendies « *National Fire Protection Association* (NFPA) », l'Institut national américain de normalisation « *American National Standards Institute* (ANSI) » et la Société américaine des ingénieurs mécaniques « *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) ». (*National Renewable Energy Laboratory* [NREL], 2015) Puisque les États-Unis sont un regroupement de plusieurs États gérés par un gouvernement fédéral, alors la réglementation, les codes et les normes de la filière hydrogène existants peuvent être publiés « soit par le gouvernement fédéral, soit [par un] État », soit par l'une des organisations décrites précédemment : par exemple « la NFPA ou l'instance fédérale de normalisation (ANSI) ». (INERIS, 2016)

Au niveau fédéral par exemple, plusieurs départements au nombre desquels figurent les Départements de l'énergie, du travail et du transport, travaillent en collaboration avec les organisations nationales et internationales pour « faciliter la création et l'adoption de codes de construction et de normes concernant l'utilisation de l'hydrogène dans des applications [...] de transport » (INERIS, 2016). Cette collaboration a permis d'élaborer les règlements suivants :

- OSHA 29 CFR 1910 « *Hydrogen* »

Le règlement OSHA 29 CFR 1910 « *Hydrogen* », en lien avec les installations contenant de l'hydrogène gazeux ou liquide, a été élaboré par le Département du travail américain en collaboration avec l'Administration de la sécurité et de la santé au travail (*Occupational Safety and Health Administration*: OSHA). Il permet de définir des exigences de sécurité au niveau du stockage, de l'utilisation et de la manipulation de l'hydrogène sur les lieux de travail. (NREL, 2015)

- DOT 49 CFR 171-179

Le règlement DOT 49 CFR 171-179 a été élaboré par le Département du transport américain « *Department of Transportation* (DOT) ». Il définit des exigences de sécurité en lien avec le transport de l'hydrogène dans le commerce. (NREL, 2015) Le tableau 3.5 présente une vue d'ensemble des réglementations, codes et normes en lien avec les infrastructures d'hydrogène qui ont été élaborés au niveau du gouvernement fédéral américain.

**Tableau 3.5 Liste des réglementations, codes et normes en lien avec les infrastructures d'hydrogène au niveau fédéral** (compilé de : INERIS, 2016, p.71-73; NREL, 2015, p.14; NREL, 2016, p.45).

	Nom	Exigences
<b>Règlementation fédérale</b>	<i>ASHA 29 CFR 1910 « Hydrogen »</i>	Exigences concernant le stockage, l'utilisation, et la manipulation sécuritaire de l'hydrogène dans un lieu de travail.
	<i>DOT 49 CFR 171-179</i>	Exigences concernant le transport sécuritaire de l'hydrogène dans le commerce.
<b>Codes nationaux américains</b>	<i>International Building Code (IBC)</i>	Exigences générales de construction d'un bâtiment en fonction de la classe d'occupation.
	<i>International Fire Code (IFC) 2012</i>	Exigences minimales concernant la protection contre les risques d'incendie (gaz inflammable et gaz comprimé), d'explosion et définit les règles d'intervention lors d'opérations d'urgence dans les stations-service ainsi que lors du stockage et la production d'hydrogène (chapitre 22, section 2309).
	<i>International Mechanical Code (IMC)</i>	Exigences relatives à la ventilation pour l'utilisation d'hydrogène dans les locaux intérieurs.
	<i>International Fuel Gas Code (IFGC)</i>	Exigences relatives à la tuyauterie de gaz inflammable.
<b>Codes et normes spécifiques aux technologies de l'hydrogène</b>	<i>NFPA 2 « Hydrogen Technologies »</i>	Exigences pour la conception, la production (technologies), le stockage, le transfert, l'utilisation et la manipulation d'hydrogène.
	<i>NFPA 55 « Compressed Gas and Cryogenic Fluids Code »</i>	Exigences concernant à la fois les systèmes d'hydrogène gazeux et liquide. Cette norme couvre également, l'exploitation et la protection incendie des stations-service d'hydrogène.
	<i>NFPA 853 « Standard for the installation of Stationary Fuel Cell Power Systems »</i>	Exigences concernant l'installation de toutes les piles à combustible utilisées lors des usages stationnaires de l'hydrogène.
<b>Normes spécifiques à la performance et à l'installation des composants des technologies de l'hydrogène</b>	<i>ASME B31.3 and B31.12 « Hydrogen piping and pipelines »</i>	Exigences relatives aux tuyauteries et canalisations transportant et distribuant de l'hydrogène pour des applications commerciales et résidentielles.
	<i>ASME « Boiler and Pressure Vessel (BPV) Code »</i>	Exigences de sécurité des équipements sous pression. Définit les règles régissant la conception, la fabrication et l'inspection des chaudières et des récipients sous pression.
	<i>CGA S series</i>	Exigences relatives aux dispositifs de décompression des conteneurs.
	<i>CGA H-5 (2014) « Installation Standard for Bulk Hydrogen supply systems »</i>	Exigences minimales relatives aux systèmes d'approvisionnement en hydrogène.
	<i>CGA G-5.4 (2012) « Standard for Hydrogen piping systems at consumer sites »</i>	Norme décrivant les spécifications et les exigences pour les tuyauteries.
	<i>CGA G-5.5 (2014) « Hydrogen vent systems »</i>	Norme présentant les exigences de conception des systèmes des événements d'hydrogène. Elle fournit des recommandations pour assurer leur fonctionnement en sécurité.
	<i>CGA G-5.6 (2013) « Hydrogen pipeline systems »</i>	Norme relative aux systèmes de transport et distribution de l'hydrogène
	<i>UL 2264B « Gaseous hydrogen generation appliances-Water reaction »</i>	Guide relatif aux générateurs d'hydrogène destinés à une utilisation industrielle, commerciale et résidentielle. Renferme des exigences en matière de construction, performance, marquage, instructions, tests et vérifications.
	<i>SAE J2601</i>	Exigences relatives au ravitaillement en hydrogène des véhicules afin de raccourcir le temps de remplissage et d'éviter d'endommager le réservoir des véhicules.

Plusieurs États américains ont également élaboré des réglementations qui encadrent la production, le stockage et l'utilisation de l'hydrogène de manière spécifique sur leur territoire. C'est le cas par exemple des États de la Californie et de la Caroline du Sud :

- La réglementation de la Californie dénommée « *California Fire Code (CFC)* », qui s'applique à la filière hydrogène, intègre plusieurs exigences des normes et réglementations fédérales décrites dans le tableau 3.5 (notamment la norme NFPA 2 spécifique aux technologies d'hydrogène). De plus, le code de la construction (*California Building Code*333) ainsi que la Loi sur la qualité de l'environnement californienne « *California Environmental Quality Act (CEQA)* » encadrent les processus de délivrance de permis. (NREL, 2015)
- L'État de la Caroline du Sud, par exemple, a adopté la Loi dénommée « *South Carolina Hydrogen Permitting Act* » qui encadre le processus d'autorisations pour l'installation des infrastructures d'hydrogène (NREL, 2015).

## **4. SITUATION DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE AU QUÉBEC**

Ce chapitre présente la situation actuelle et projetée de la filière hydrogène au Québec ainsi que les différents acteurs associés.

### **4.1 Parties prenantes**

Au Québec, plusieurs acteurs interviennent dans la chaîne de valeur de la filière hydrogène qui comprend les étapes de production, stockage et distribution, conversion et enfin utilisation de l'hydrogène. Ces acteurs comprennent les établissements universitaires et les centres de recherche, les organisations gouvernementales et les organismes et entreprises du secteur industriel.

#### **4.1.1 Établissements d'enseignement et centres de recherche**

Le Québec dispose de plusieurs établissements d'enseignement et centres de recherche qui ont développé une expertise dans le domaine de l'électrification des transports. Parmi eux, il est intéressant de citer :

- L'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH)

L'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH) de l'Université du Québec à Trois-Rivières, créé en 1993, se présente comme l'un des acteurs majeurs intervenant dans le domaine de la recherche et du développement sur l'hydrogène et des PAC. L'IRH réalise des recherches axées sur le stockage, le transport, la sécurité et les utilisations de l'hydrogène dans plusieurs domaines, notamment ceux de la « mobilité électrique, des batteries ainsi que des matériaux prometteurs que sont les nanostructures de carbone, dont le graphène ou les nanotubes ». (Institut de recherche sur l'hydrogène – Université du Québec à Trois-Rivières [IRH – UQTR], s. d.a) Dans le domaine de la mobilité électrique par exemple, l'IRH travaille présentement sur la technologie de « l'hybridation batterie – PAC » qui se présente comme étant « une solution prometteuse et viable permettant d'enlever les derniers verrous technologiques limitant l'autonomie des véhicules électriques » (IRH – UQTR], s. d.b). Ainsi, dans le cadre de ces recherches en lien avec l'utilisation des technologies de PAC dans la mobilité propre, une station-service à hydrogène (la première du genre au Québec) a été installée sur le site de l'IRH en 2012 (IRH – UQTR, s. d.a). De plus, en 2016, l'IRH a bénéficié d'un investissement de 200 000 dollars de la part du gouvernement québécois afin de réaliser deux projets de recherche et développement en lien avec l'hydrogène. Le premier projet concerne la réalisation d'essais et de tests de fiabilité, dans le contexte climatique du Québec, sur le premier véhicule électrique à PAC du Québec (un véhicule de marque Tucson de Hyundai) afin de prolonger son autonomie. Le second projet est en lien avec « le développement d'outils de gestion de la demande d'énergie de la clientèle résidentielle des réseaux électriques autonomes ». (Université du Québec à Trois-Rivières [UQTR], 2016)

- L’Institut de recherche d’Hydro-Québec (IREQ)

L’IREQ est actif depuis plus de 40 ans dans le secteur de la recherche et le développement dans les domaines en lien avec les réseaux électriques et les énergies renouvelables. Il dispose de deux centres de recherche, en l’occurrence le « Laboratoire des technologies de l’énergie (LTE) de Shawinigan » et le « Laboratoire de recherche et d’essais de Varennes », dans lesquels se réalise la majorité des activités de recherche et développement. (Hydro-Québec, 2018a) En 2017, l’IREQ disposait d’un budget annuel de 127 millions de dollars alloués à la recherche et développement (Hydro-Québec, 2018b). L’un des axes majeurs de la recherche de l’IREQ concerne principalement l’électrification des transports terrestres. Les actions dans ce secteur sont en lien avec « la recherche de solutions visant l’utilisation de l’électricité dans les transports collectifs et individuels » (Hydro-Québec, 2018c).

- L’Institut national de la recherche scientifique – Énergie, Matériaux et Télécommunications (INRS-ÉMT)

L’Institut national de la recherche scientifique (INRS), par l’intermédiaire de son centre de recherche dénommé « Énergie, Matériaux et Télécommunications (ÉMT) », réalise des recherches axées sur le développement de nouveaux matériaux appliqués dans les secteurs de l’énergie et de l’environnement. L’institut dispose de plusieurs chercheurs, titulaires de chaires, qui travaillent en collaboration avec des partenaires des secteurs public, parapublic et privé. C’est le cas par exemple de la « Chaire de recherche du Canada en matériaux énergétiques » dont l’importance principale est « d’innover dans le domaine des PAC et du stockage de l’énergie afin de diminuer l’utilisation des combustibles fossiles » qui ont de nombreuses répercussions sur l’environnement. (INRS, 2018; Gouvernement du Canada, 2013)

- Hydrogen Link inc.

Hydrogen Link inc. est un organisme de recherche et développement, situé à Montréal, dont les axes de recherche portent principalement sur le développement de « nouveaux matériaux, catalyseurs et procédés de synthèse pour les technologies renouvelables et durables ». Les activités de Hydrogen Link portent en outre sur les « méthodes de génération d’hydrogène [ainsi que leur] stockage dans les hydrures métalliques ». (Hydrogen Link, s. d.)

- Institut du véhicule innovant (IVI)

L’Institut du véhicule innovant (IVI), créé en 2015 à la suite de la fusion entre le Centre national du transport avancé (CNTA) et l’Institut du transport avancé du Québec (ITAQ), a développé une expertise poussée dans le domaine « de l’ingénierie et la conception de solutions technologiques pour des projets axés sur les véhicules électriques, hybrides et autonomes [ainsi que] l’efficacité énergétique » (MESI,

2017). L'IVI se présente comme l'un des acteurs majeurs dans le secteur de la mobilité électrique au Québec (Gouvernement du Canada, 2018).

#### **4.1.2 Organisations gouvernementales**

Au Québec, plusieurs ministères œuvrent au développement de la filière hydrogène, dont le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET), le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) et le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). Le MERN, par exemple, est responsable de l'organisme dénommé « Transition énergétique Québec (TEQ) » créé en 2017, dont la mission principale est de « soutenir, stimuler et promouvoir la transition, l'innovation et l'efficacité énergétiques et d'en assurer une gouvernance intégrée ». De plus, le MERN est également responsable de la société d'État, Hydro-Québec, responsable de la production d'électricité au Québec. (MERN, 2018; TEQ, 2017)

#### **4.1.3 Organismes et entreprises du secteur industriel**

Le Québec comporte une variété d'organismes et entreprises qui œuvrent dans le domaine de l'électrification des transports. C'est le cas par exemple des entreprises suivantes :

- Hydrogenics

Hydrogenics est une entreprise spécialisée dans la conception, la fabrication et l'installation de systèmes de production d'hydrogène propre. L'entreprise se présente comme « le chef de file » dans le secteur du stockage de l'énergie au Canada. Ainsi, Hydrogenics conçoit et fabrique « des modules de production d'hydrogène et d'alimentation électrique fonctionnant à l'hydrogène ». (Gouvernement du Canada, 2018) Hydrogenics a été « impliqué dans [la construction] de plus de 45 stations-service à hydrogène depuis le début le début des années 2000 et a livré des centaines de véhicules électriques (autobus) à PAC » (Services Techniques et Commerciaux Mij inc., 2013).

- Air Liquide Canada

Air Liquide Canada, créé en 1911, est l'un des acteurs majeurs de la filière hydrogène au Québec. L'entreprise a développé une expertise dans les domaines de la production, de la distribution ou du stockage de l'hydrogène ainsi que celui de la construction et l'exploitation des stations de ravitaillement en hydrogène pour les véhicules électriques à PAC dans le monde entier. À ce titre, Air Liquide participe au projet pilote de réalisation de plusieurs stations multicarburant au Québec, initié par le gouvernement québécois en 2016. (Air Liquide Canada, 2018)

- TechnoCentre Éolien

TechnoCentre Éolien est un organisme à but non lucratif, fondé en 2000, ayant pour mission «de contribuer au développement [de la] filière industrielle éolienne au Québec». Ayant développé une expertise dans la recherche et le transfert de technologie dans le domaine du stockage de l'énergie, TechnoCentre Éolien travaille présentement en collaboration avec divers partenaires (industriels, universitaires et gouvernementaux) afin d'aider «les entreprises à adapter leur technologie au climat froid, à développer de nouveaux produits pour l'industrie éolienne et à intégrer la chaîne d'approvisionnement québécoise». (TechnoCentre Éolien, 2013)

- PMG Technologies

PMG Technologies est une entreprise québécoise, affiliée à Transport Canada, qui «réalise des tests de conformité sur les véhicules électriques et innovants pour les gouvernements et les fabricants» (MESI, 2017). Ainsi, elle dispose d'une forte expertise dans le domaine de la certification des véhicules et participe, par l'intermédiaire de son centre d'essais et de recherche automobile ultra moderne, «aux groupes de travail internationaux pour l'harmonisation des normes automobiles» (PMG Technologies, 2011).

- FPInnovations

FPInnovations est un organisme à but non lucratif qui dispose d'une expertise en lien avec la création et l'implantation de solutions scientifiques novatrices dans le domaine du transport. L'organisme possède plusieurs groupes de recherche dont le «Groupe Performance, Innovation, Transport (Groupe PIT)», qui est un groupe d'ingénierie lequel opère dans le domaine de la recherche et développement, associé à l'implantation de technologies durables et efficaces dans le secteur du transport. Le Groupe PIT a développé une expertise de recherche et développement en lien avec l'implantation de technologies utilisant des carburants alternatifs dans le transport. (FPInnovations, 2018)

- Énergir

Énergir, anciennement dénommée «Gaz Métro», est la principale entreprise de distribution de gaz naturel au Québec. Elle dispose d'un réseau de distribution, principalement souterrain, qui s'étend sur plus de 10 000 km à travers le Québec et permet d'approvisionner le secteur résidentiel, commercial et industriel. (Énergir, 2017a) Énergir, se présente comme un acteur majeur qui pourrait contribuer au développement de la filière hydrogène au Québec. L'entreprise intervient déjà dans plusieurs projets majeurs associés à l'usage des technologies d'électrolyse couplées aux PAC. C'est le cas par exemple du projet d'installation de la plus grande éolienne (3 MW de puissance) réalisée sur le site de la mine Raglan au Nunavik dans le

Grand Nord québécois en 2014 (Énergir, 2016). Ce projet a permis de déployer « un système novateur de transmission et de stockage d'énergie » utilisant un système d'électrolyseur couplé à une PAC et une batterie au lithium de longue durée. Ainsi, le système d'électrolyse permet de stocker le surplus d'énergie éolienne produite sous la forme d'hydrogène dans un réservoir, et par la suite l'hydrogène est retransformé en électricité à travers une PAC pour combler la demande en énergie de la mine en fonction des besoins. (Énergir, 2016)

- Tugliq Énergie

Tugliq Énergie est une entreprise québécoise qui contribue au développement de projets innovants dans le domaine des énergies renouvelables et des énergies propres. L'entreprise a développé une expertise en « intégration et stratégie de contrôle de systèmes de stockage d'énergie afin d'assurer la fiabilité et la facilité d'opération des réseaux hybrides ». C'est le cas par exemple du système de stockage d'hydrogène développé par l'entreprise, dénommé « Boucle hydrogène ». C'est un système composé d'électrolyseurs associés à des PAC, qui permet « de couper l'énergie renouvelable excédentaire et de la convertir en hydrogène par électrolyse. L'hydrogène converti peut ensuite subir le processus inverse pour produire de l'électricité » en fonction des besoins en énergie associés aux opérations. (Tugliq Énergie, 2018)



**Figure 4.1** Système de stockage de l'hydrogène (Boucle hydrogène) (tiré de : Tugliq Énergie, 2018).

- Hyteon Inc.

Hyteon Inc. est une entreprise québécoise « qui commercialise des systèmes de cogénération résidentielle utilisant des piles à combustible ». L'entreprise a, depuis 2003, investi un montant total de 25 millions de dollars dans la recherche et le développement associé aux technologies de l'hydrogène et des PAC. Le



système développé et breveté par Hyteon permet à la clientèle résidentielle de produire sa propre électricité ainsi que de subvenir à ses besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire. Ce système installé en Allemagne a par exemple permis à un client résidentiel « d'économiser environ 20 % sur sa facture énergétique soit 1000 dollars annuellement » et de réduire ses émissions de GES de plus d'une tonne eCO<sub>2</sub> par année. (MERN, 2013) Le tableau 4.1 présente un aperçu de quelques entreprises, centres de recherche et organismes actifs dans la filière hydrogène au Québec.

**Tableau 4.1 Liste des entreprises, centres de recherche et organismes actifs dans la filière hydrogène au Québec** (modifié de : MERN, 2003, p.106 ; Services Techniques et Commerciaux Mij inc., 2013, p.11).

Secteur	Acteurs	Spécialisation
Industriel	Air Liquide Canada	Production, distribution d'hydrogène liquide et gazeux
	H POWER Canada	Piles à combustible (stationnaires)
	Hydrogen Link	Recherche sur les technologies de stockage de l'hydrogène (Hydrures métalliques)
	Systèmes énergétiques Stuart	Électrolyseurs
	TEKTREND/R-D TECH	Examen et essais (réservoirs)
	Hydrogenics	Recherche et développement en lien avec la production, le stockage, et l'utilisation de l'hydrogène
	Hyteon Inc.	Cogénération résidentielle utilisant des PAC
	TechnoCentre éolien	Recherche et développement en lien avec la production, le stockage, la conversion et l'utilisation de l'hydrogène
	FPIInnovations	Recherche et développement en lien avec les technologies d'utilisation de l'hydrogène dans le transport
	PPG Canada Inc.	Production et commercialisation de l'hydrogène
Centres de recherche	Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH)	Recherche et développement sur les PAC pour les véhicules électriques.
	Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ)	Offre une expertise industrielle et universitaire à l'industrie du transport dans le domaine la propulsion électrique et hybride.
	Laboratoire des technologies de l'énergie (LTE) d'Hydro-Québec	Piles à combustible
	Chaire en électrocatalyse de l'Université de Sherbrooke	Électrolyse et matériaux
	Chaire en hydrogène de l'Université McGill	Stockage de l'hydrogène (Hydrures métalliques)
Centres de recherche	Laboratoire d'électrochimie et des matériaux énergétiques de l'École Polytechnique de Montréal	Piles à combustible (matériaux)
	L'Institut national de la recherche scientifique – Énergie, Matériaux et Télécommunications (INRS-ÉMT)	Recherche axée sur le développement de nouveaux matériaux (Nanomatériaux) appliqués dans les secteurs de l'énergie et de l'environnement.
	Institut de véhicule innovant (IVI)	Ingénierie et la conception de solutions technologiques pour des projets axés sur les véhicules électriques et hybrides.
	PMG Technologies	Réalisation de tests de conformité sur les véhicules électriques et innovants.
Organisme connexe	Bureau de normalisation du Québec (ISO/TC 197)	Normes et mesures de sécurité

## **4.2 État de la situation**

### **4.2.1 Système énergétique du Québec**

Le Québec bénéficie d'un système énergétique unique au monde qui se caractérise par la place importante occupée par les énergies renouvelables (hydroélectricité, biomasse et éolien) dans son mix énergétique. En effet en 2015, les sources locales d'énergies renouvelables représentaient environ 47 % (hydroélectricité : 35 %, biomasse : 7 %, éolien : 5 %) du total des besoins énergétiques du Québec. Par ailleurs, le Québec a produit environ 202 TWh d'électricité en 2016, dont 99 % provenaient de source hydroélectrique. (Whitmore et Pineau, 2017) Une partie de l'électricité produite (37,5 TWh) est exportée, par le réseau de transport d'électricité de la division « Hydro-Québec TransÉnergie » d'Hydro-Québec, vers les États-Unis (État de New York : 29 %, État du Vermont : 27 %, État du Maine : 9 % et la région de la Nouvelle-Angleterre : 3 %), l'Ontario (18 %) et le Nouveau-Brunswick (14 %). Ces exportations occasionnent des pertes d'énergie annuelles de l'ordre de 6,3 % sur le réseau de transmission. (Whitmore et Pineau, 2017)

### **4.2.2 Historique du développement de la filière hydrogène québécoise**

Le développement de la filière hydrogène a été initié au début des années 1980 par la volonté du gouvernement québécois de soutenir la recherche dans ce secteur. Cela a favorisé la prise d'initiatives dans le domaine de la recherche et le développement, associé aux technologies de l'hydrogène et des PAC, au niveau de plusieurs organismes et entreprises du secteur industriel. Par ailleurs, plusieurs universités québécoises, dont l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), ont entrepris dans cette même période des actions de collaboration afin de participer à des projets de recherche axés sur l'hydrogène. C'est le cas par exemple du projet « Euro-Québec Hydro-Hydrogène (EQHH) », financé à la fois par la Commission européenne et le gouvernement du Québec à hauteur de 60 millions de dollars entre 1989 et 1997, qui a permis à plusieurs organismes de recherche québécois de démontrer, grâce à une vingtaine de projets pilotes, que « le stockage et le transport de l'hydrogène [ainsi] que son utilisation dans le transport en commun en milieu urbain » étaient sécuritaires et réalisables. L'implication active de l'UQTR au projet EQHH a permis de créer en 1994 l'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH), qui représente à ce jour au niveau du Québec « la plus importante masse critique et le seul institut universitaire canadien de recherche et de formation supérieure dans le domaine de l'hydrogène ». (Assemblée nationale du Québec [ANQ], 2005) Par la suite, le gouvernement en collaboration avec l'UQTR contribua à la création de la « Société de valorisation et d'exploitation industrielle (E-H2 inc.) » en 2001, dont la principale mission était de « favoriser l'émergence d'une filière québécoise de l'hydrogène ». La société E-H2 a ainsi facilité la mise en œuvre de plusieurs projets pilotes incluant l'hydrogène entre 2001 et 2005. C'est le cas par exemple des projets pilotes favorisant l'usage de « l'Hythane », qui était un

carburant alternatif composé d'un mélange de gaz naturel (80 – 85 %) et d'hydrogène (15 – 20 %), dans le secteur industriel ainsi que celui du transport. Par ailleurs, l'E-H2 bénéficiait d'une subvention gouvernementale annuelle de 300 000 dollars et était accompagné, dans le cadre de son mandat, par l'IRH qui lui apportait un soutien technique dans le domaine de la recherche et le développement. (ANQ, 2005)

La région de la Mauricie, abritant l'UQTR et l'IRH, a été par la suite identifiée par le gouvernement du Québec en 2002 comme étant un pôle majeur de développement de la filière hydrogène au Québec, du fait de la réputation régionale et nationale acquise par l'IRH dans le domaine de la recherche associée aux technologies de l'hydrogène et des PAC. Par ailleurs, en 2003, la Mauricie a également été choisie par le gouvernement fédéral du Canada «comme région pilote pour la mise en œuvre d'un Plan d'innovation dans le cadre de la Stratégie d'innovation Canada», car reconnaissant le potentiel du développement des activités du secteur énergétique dans cette région. L'IRH a donc bénéficié de plusieurs subventions de la part du gouvernement et de certains organismes publics afin de soutenir ses activités de recherche associées à l'hydrogène. C'est le cas par exemple de la subvention de 3 millions de dollars octroyée par la compagnie Hydro-Québec à la «campagne de financement de la Fondation de l'UQTR, afin de favoriser le développement de l'IRH d'ici 2013». (ANQ, 2005)

Le développement de la filière hydrogène s'est par la suite poursuivi en faveur du projet «d'action concertée de coopération régionale de développement (ACCORD)», mis en place pendant la période 2002-2013 par le gouvernement québécois. Ce projet avait pour but de «positionner les régions du Québec comme sièges de compétences industrielles particulières reconnues dans le monde» en s'appuyant sur les potentialités ainsi que sur la «mobilisation et le dynamisme des gens d'affaires [existants au niveau de ces régions]». (Ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations [MEIE], 2011) Ainsi, un «créneau d'excellence ACCORD sur l'hydrogène», réunissant une cinquantaine d'entreprises de la filière hydrogène, a été mis en place dans la région de la Mauricie, dans le cadre du projet ACCORD. Ce créneau avait pour objectif de faire de cette région «le chef de file international dans la mise en œuvre d'une économie axée sur les technologies de l'hydrogène comme vecteur énergétique durable». (MEIE, 2011) Plusieurs financements ont été accordés au secteur industriel, dans le cadre du créneau d'excellence ACCORD sur l'hydrogène. C'est le cas par exemple de l'Université du Québec à Trois-Rivières, qui a bénéficié d'un investissement d'environ 252 000 dollars en 2011 de la part du gouvernement québécois afin d'assurer la mise en œuvre du plan d'action associé au créneau ACCORD sur l'hydrogène. (MEIE, 2011) Par ailleurs, durant le développement du projet du créneau ACCORD en Mauricie, les industriels du secteur hydrogène avaient «priorisé la mise en œuvre de projets structurants au niveau des régions éloignées ainsi que la mise en place d'un système d'information et de formation en sécurité lié à l'hydrogène-énergétique». Ces projets ont atteint leur maturité aujourd'hui dans les régions nordiques non

connectées au réseau de distribution d'Hydro-Québec, grâce à la mise en place du système de stockage de l'énergie éolienne couplé aux technologies d'électrolyseurs et des PAC, développés par la compagnie Tugliq Énergie. (Services Techniques et Commerciaux Mij inc., 2013 ; Tugliq Énergie, 2018)

Il est bon d'indiquer enfin que le Québec dispose d'une forte expertise dans le développement des techniques de pointe liées à l'hydrogène, du fait de la présence sur son territoire de plusieurs entreprises et organismes de recherche qui œuvrent dans le domaine de la recherche et le développement associé à la chaîne de valeur de la filière hydrogène. De plus, le Québec bénéficie également d'un fort potentiel de production d'électricité, de source hydroélectrique, et a « accès aux meilleures technologies de production d'hydrogène par électrolyse [ainsi que le développement] des systèmes de stockage parmi les plus avancés au monde ». (MERN, 2004) Le tableau 4.1 présente une liste non exhaustive des acteurs majeurs intervenant dans la filière hydrogène au Québec.

#### **4.2.3 Perspectives**

En janvier 2018, le Québec ne comptabilisait qu'une seule station-service d'hydrogène sur son territoire, soit celle située sur le site de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Cette station a été construite en 2012 afin de soutenir les activités de recherche de l'IRH. (IRH – UQTR, s. d.a) Le gouvernement québécois, dans le cadre de sa nouvelle politique énergétique, s'est fixé plusieurs objectifs à atteindre à l'horizon 2030. Ces objectifs comprennent l'amélioration de 15 % de l'efficacité énergétique, la réduction de 40 % de la quantité de produits pétroliers consommés, l'augmentation de 25 % de la production totale d'énergies renouvelables et enfin l'augmentation de 50 % de la production de bioénergie au Québec. (Gouvernement du Québec, 2016) Pour atteindre ces objectifs, le gouvernement a créé en 2017 l'organisme dénommé « Transition Énergétique Québec », dont le mandat vise l'augmentation des « activités d'innovation technologique en efficacité énergétique et en production et consommation d'énergies renouvelables », ainsi que le soutien de la « décarbonisation du transport [...], notamment au moyen de véhicules électriques ou qui consomment des carburants à moindre teneur en carbone ». (TEQ, 2018) Le gouvernement du Québec s'est donc engagé, dans le cadre du Plan économique du Québec de 2018, à développer la filière de l'hydrogène. Ainsi, il prévoit allouer un montant total de 17,2 millions de dollars sur 5 ans afin de développer la filière hydrogène. Les investissements du gouvernement québécois serviront dans un premier temps à effectuer une étude « technicoéconomique sur la filière hydrogène, à effectuer la mise à jour des différentes normes applicables à l'hydrogène » et à mettre en place un projet pilote d'une station multicarburant (essence, biocarburants, gaz naturel, propane, électricité et hydrogène), dans une région à fort potentiel d'utilisation. Le projet pilote de station-service sera par la suite étendu à l'échelle du Québec d'ici l'horizon 2030. (Gouvernement du Québec, 2018) Dans le cadre de la réalisation de ce projet pilote, la ville de Québec a été retenue comme lieu d'implantation de la première station-

service qui nécessitera un investissement total de 5,2 millions de dollars et la collaboration de plusieurs acteurs de la filière hydrogène, dont le gouvernement du Québec par l'intermédiaire de l'organisme TEQ, Hydro-Québec, Gaz Métro, Air-Liquide, Toyota Canada et Énergie Sonic (une Coop fédérée). Cette station, dont l'achèvement est prévu pour la fin 2018 - début 2019, sera équipée d'un électrolyseur afin de faciliter la production d'hydrogène (jusqu'à 200 kg par jour) sur le site. De plus, un total de 50 véhicules électriques à PAC, de modèle Mira du concessionnaire Toyota Canada, seront livrés au gouvernement québécois d'ici la fin 2018 afin d'effectuer des essais avant le déploiement de trois autres stations de la même nature dans les régions de Montréal, de l'Estrie et de l'Outaouais. (MERN, 2016 ; TEQ, 2018) Les objectifs du projet pilote de station-service multicarburant sont multiples et comprennent principalement (MERN, 2016) :

- Le développement, la disposition et l'accroissement de la demande pour des carburants alternatifs diversifiés au niveau des consommateurs québécois;
- La confirmation de la faisabilité technique et commerciale de la cohabitation d'une offre diversifiée de carburants au niveau d'un même site d'approvisionnement;
- L'acquisition d'une expertise ainsi que l'élaboration de concepts propres aux réalités québécoises;
- L'établissement de partenariats d'affaires et technologiques indispensables au déploiement efficace des infrastructures d'approvisionnement en hydrogène sur tout le territoire du Québec.

Le gouvernement québécois, dans le cadre de l'atteinte des objectifs de sa politique énergétique à l'horizon 2030 liés à la réduction des GES, a également mis en place au niveau du Québec la norme « véhicule zéro émission (ou loi VZE) » en vigueur depuis le mois de janvier 2018. La norme VZE a pour objectif d'imposer des quotas de vente croissants de VZE aux constructeurs de véhicules établis au Québec, entre 2018 et 2025, afin de stimuler l'offre et la disponibilité des véhicules propres au Québec. Cette norme, qui a déjà fait ses preuves en Californie, définit trois classes (petit, moyen et grand) de constructeurs assujettis. Ainsi, ces constructeurs établis au Québec seront obligés désormais d'accumuler des crédits en procurant des VZE au marché québécois. Par ailleurs, il est bon de préciser également que, « le pourcentage de crédit obligatoire à accumuler par chaque constructeur est calculé en fonction de la quantité totale de véhicules automobiles neufs qu'il aura vendus ou loués au Québec ». (MELCC, 2016a)

## **5. IMPACTS DE L'USAGE DE L'HYDROGÈNE**

Ce chapitre présente les impacts environnementaux, sociaux et économiques de l'usage de l'hydrogène à la lumière de la revue de la littérature.

### **5.1 Impacts environnementaux**

Les impacts environnementaux de l'usage de l'hydrogène sont nombreux et couvrent plusieurs enjeux associés aux changements climatiques, à la réduction de la pollution, au bruit environnemental et à la transition énergétique.

- **Changements climatiques**

Les changements climatiques, provoqués par les émissions de GES associés à l'usage des combustibles fossiles dans le secteur du transport, font partie des défis majeurs qui préoccupent la majorité des gouvernants. Au Québec, le secteur des transports était responsable d'environ 43 % des émissions totales de GES en 2013. De plus, ce secteur comptait pour « 70 % de la consommation totale des produits pétroliers utilisés à des fins énergétiques au Québec, en 2014 ». (Whitmore et Pineau, 2017) Ainsi, l'hydrogène produit grâce à la technologie des électrolyseurs et à partir d'une source d'énergies renouvelables (hydroélectricité, solaire et éolien) peut se substituer aux énergies fossiles dans le secteur des transports, grâce à l'usage d'une PAC, et répondre aux défis actuels de changement climatique grâce à des réductions nettes d'émissions de GES. Il est bon de préciser que la réaction combinée de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air au niveau de la PAC d'un véhicule électrique à hydrogène ne génère que de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. (Bento, 2010; ADEME, 2011) Selon le « plan de déploiement national des véhicules hydrogène » de la France, l'usage de l'hydrogène dans le transport permettra de réduire de 1,2 Mt les émissions de CO<sub>2</sub> (77 %) de ce secteur d'ici 2030 (AFHYPAC, 2014). Les prévisions à l'horizon 2050, en lien avec le déploiement de la filière hydrogène dans le monde, indiquent précisément que « les solutions hydrogène déployées à grande échelle pourraient contribuer à hauteur de 20 % pour limiter le réchauffement climatique à 2 °C » (AFHYPAC, 2017).

- **Réduction de la pollution**

La réduction de la pollution atmosphérique évitée par l'usage des véhicules électriques à hydrogène, en comparaison des véhicules classiques possédant un moteur à combustion interne, intervient principalement sur le plan de l'absence d'émissions « d'oxydes d'azote, de gaz organique non méthanique, de monoxyde de carbone, de formaldéhyde, de matières particulaires [...] ainsi que de dioxyde de soufre » (MELCC, 2017). La PAC associée aux véhicules électriques à hydrogène constitue « une solution

technologique de rupture » qui permet de réduire les nuisances liées aux usages énergétiques dans le secteur du transport, principalement en milieu urbain (ADEME, 2011).

- Bruit environnemental

Le bruit environnemental associé à l'usage des véhicules électriques à hydrogène est quasiment inexistant à cause du caractère silencieux des moteurs de ces véhicules (Kalinowski et Pastor, 2013). En effet, pour une comparaison avec les véhicules possédant un moteur à combustion interne, les moteurs des VZE ont un bruit de propulsion « très faible par rapport au bruit du contact entre les pneus et la route ». Selon une étude réalisée dans la ville d'Utrecht aux Pays-Bas en 2010 sur les VZE, il a été démontré que le nombre de personnes moyennement dérangées par le bruit dans la ville serait réduit de 33 % « si 90 % des véhicules légers et 80 % des véhicules lourds, [circulant dans cette ville], étaient des [VZE] ». Par ailleurs, dans ces mêmes conditions, les résultats de l'étude précisent également que « le nombre d'habitants fortement dérangés par le bruit diminuerait de 36 % ». (MELCC, 2017)

- Transition énergétique

La transition du système énergétique mondial, fortement dépendant des énergies fossiles, vers des énergies propres se présente comme l'un des défis majeurs en réponse à la problématique du réchauffement climatique. Face à ces défis, l'hydrogène propre qui est produit à partir de la combinaison de la technologie des électrolyseurs et des sources électriques renouvelables se présente comme un « vecteur énergétique polyvalent, indispensable pour réussir la transition [sur l'ensemble de la chaîne de valeur] de l'énergie ». (AFHYPAC, 2018d) Il permet en effet, grâce à la technologie des électrolyseurs et des PAC, d'intégrer efficacement les « énergies renouvelables dans le mix énergétique et les transports [en plus de] l'optimisation du réseau électrique », tout en réduisant l'empreinte carbone des secteurs des transports, de l'industrie et du bâtiment (AFHYPAC, 2014). Par ailleurs, l'hydrogène peut être utilisé en association avec les technologies de séquestration du CO<sub>2</sub> afin de produire « des matières premières [de synthèse] renouvelables pour l'industrie chimique, et créer ainsi, un moyen viable de recyclage du carbone » (AFHYPAC, 2018). Enfin, l'hydrogène peut contribuer à l'équilibre de la variation « intersaisonnière des réseaux électriques » grâce au stockage en grande quantité du surplus de production des sources d'énergies renouvelables, durant les périodes de faibles demandes, dans le réseau gazier et cela sur de longues durées afin de les rendre disponibles en fonction de la demande (ADEME, 2018).

## 5.2 Impacts sociaux

Les impacts sociaux associés à l'usage des technologies de l'hydrogène sont nombreux. Ces impacts comprennent : l'amélioration de la qualité de vie des populations, l'acceptabilité sociétale, la création d'emplois, l'autonomie énergétique et l'amélioration de la collaboration des entreprises.

- Amélioration de la qualité de vie des populations

L'amélioration de la qualité de vie des populations, «notamment en milieu urbain et périurbain», se présente comme l'un des aspects positifs majeurs de l'usage des technologies de l'hydrogène dans la mobilité électrique. En effet, le caractère silencieux des moteurs des véhicules électriques à PAC permet de réduire les nuisances sonores associées à ces véhicules en comparaison des véhicules classiques à combustion interne qui eux, génèrent beaucoup de bruits. (ADEME, 2011) De plus, la réduction des émissions de polluants atmosphériques, comme les particules, les oxydes d'azote et les composés organiques volatils, évitées grâce à l'usage des véhicules électriques à PAC, permet de contribuer à l'amélioration de la qualité de l'air des centres urbains et d'éviter des coûts supplémentaires en matière de soins de santé de la population (MELCC, 2016b). Il est important d'indiquer que les polluants atmosphériques ont des «impacts importants en matière de santé publique (maladies respiratoires, cardiovasculaires et cancers), particulièrement en zones urbaines» (MTES, 2017). Selon une étude réalisée par l'Institut national de la santé publique, en 2007, «la valeur monétaire des impacts sanitaires associés aux polluants atmosphériques est estimée, pour le Québec, à près de 9,5 milliards de dollars» (MELCC, 2016b). À l'opposé, en France, les maladies respiratoires et cardiovasculaires associées aux polluants atmosphériques émis par les véhicules classiques à combustion interne «occasionnent chaque année des coûts estimés [au minimum] entre 20 et 30 milliards d'euros pour la France métropolitaine» (MTES, 2017). Ainsi, l'usage des véhicules électriques à PAC à grande échelle au niveau du territoire français permettrait, à l'horizon 2050, de «réduire les polluants atmosphériques de plus de 70 000 tonnes d'oxyde d'azote [...] par an» (AFHYPAC, 2018d). Enfin, le déploiement des technologies de l'hydrogène permettra également de réduire les coûts des dépenses associées à la prise en charge des maladies respiratoires et cardiovasculaires, «en plus de contribuer à l'amélioration de la qualité de vie des citoyens» (MELCC, 2016b).

- Acceptabilité sociétale

L'acceptabilité sociétale de l'hydrogène représente un aspect important nécessaire pour le déploiement de la filière hydrogène dans un territoire donné. Elle est fortement conditionnée par la confiance de la population en la sûreté de l'hydrogène ainsi qu'en la présence d'un cadre réglementaire adéquat. (Kalinowski et Pastor, 2013). En effet, l'usage de l'hydrogène, comme vecteur énergétique, est associé à



des risques d'incendie et d'explosion, dont les niveaux de criticité sont dans l'ensemble très élevés (ADEME, 2015). Plusieurs normes ont été élaborées dans le cadre des applications industrielles de l'hydrogène, permettant ainsi de mieux contrôler ce volet de l'application de l'hydrogène. Cependant, le développement des applications en lien avec la mobilité hydrogène, notamment l'usage de l'hydrogène dans le transport, « nécessite d'adapter ces normes et règlements, ou d'en élaborer de nouveaux », du fait de leur caractère inadapté face aux nouveaux enjeux de production décentralisée (par électrolyse), de transport et de stockage de l'hydrogène. (Kalinowski et Pastor, 2013) Par ailleurs, le manque d'infrastructures d'approvisionnement d'hydrogène dans un territoire donné, associé au prix très élevé des véhicules hydrogène en plus du prix élevé de l'hydrogène à la pompe, constituent des facteurs limitants d'acceptabilité de l'hydrogène (Beeker, 2014).

- Création d'emploi

La création d'emploi associée au développement de la filière hydrogène a été documentée dans plusieurs études. Selon le rapport réalisé par l'AFHYPAC en 2018, intitulé « Développons l'hydrogène pour l'économie française », le développement de la filière hydrogène en France permettra de générer aux horizons 2030 et 2050, respectivement 45 000 et 150 000 emplois (AFHYPAC, 2018d). Par ailleurs, le déploiement des solutions hydrogène à grande échelle dans le monde entier à l'horizon 2050 permettra de « créer plus de 30 millions d'emplois dans le monde » (AFHYPAC, 2017).

- Autonomie énergétique

L'autonomie énergétique est l'un des défis majeurs, à laquelle aspirent les populations localisées dans les zones éloignées non connectées au réseau électrique des grands pôles urbains. Dans ces zones, les initiatives visant à favoriser des « actions de maîtrise de la demande d'électricité, le développement des sources renouvelables et la question du stockage sont prédominants ». (ADEME, 2018) Ainsi, l'utilisation des technologies de production de l'hydrogène, notamment les électrolyseurs couplés à des PAC en plus des sources d'énergies renouvelables (éolien, solaire et hydroélectricité), peut permettre aux populations situées dans ces zones de stocker sur de longues périodes, quelques jours ou semaines, sous forme d'hydrogène le surplus d'électricité produite de manière intermittente par les sources renouvelables, et assurer ainsi une autonomie énergétique (ADEME, 2018).

- Renforcement de la collaboration des entreprises

L'amélioration de la collaboration des entreprises impliquées dans le secteur de l'hydrogène sera renforcée grâce au développement de la filière hydrogène. En effet, la chaîne de valeur de la filière hydrogène regroupe plusieurs entreprises et acteurs, qui ont des expertises diverses tant sur le plan de la

production, du stockage, de la distribution, de la conversion que de l'utilisation de l'hydrogène (Services Techniques et Commerciaux Mij inc., 2013 ; Tugliq Énergie, 2018). Ainsi, ces différents acteurs aux compétences et expertises techniques variées se doivent de travailler en équipe dans le cadre, par exemple, des projets majeurs de déploiement des infrastructures hydrogène sur un territoire donné, afin de valoriser l'expertise de chaque acteur au niveau de chaque projet. C'est le cas par exemple du consortium « *Japan H2 Mobility LLC* », créé en 2018 au Japon, pour favoriser le développement de la filière hydrogène dans ce pays. Ce consortium a permis de regrouper plusieurs acteurs des industries de l'automobile, des compagnies du secteur énergétique japonais ainsi que la Banque de Développement du Japon afin de collaborer tous ensemble au développement de la filière hydrogène (MEF, 2018).

### **5.3 Impacts économiques**

Plusieurs impacts économiques sont associés au développement de la filière hydrogène. Ces impacts comprennent principalement : le coût élevé des infrastructures à hydrogène et des véhicules électriques à PAC et les retombées du développement d'un nouveau marché associé à la filière hydrogène.

- Coût élevé des infrastructures à hydrogène et des véhicules électriques à PAC

Le coût des infrastructures à hydrogène, à ce jour, demeure très élevé et constitue un facteur limitant au développement de la filière hydrogène. En effet, la construction d'une station-service à hydrogène en France par exemple coûte environ 1,5 million d'euros, en plus du coût associé à la compression de l'hydrogène produit sur le site de la station-service qui est équivalent de 20 % du contenu énergétique de l'hydrogène distribué. À titre de comparaison, le prix de distribution à la pompe de l'hydrogène avoisine 13 euros/kg H<sub>2</sub>, ceci pour une consommation de 1 kg H<sub>2</sub>/100 km et une dépense en carburant de 13 euros pour 100 km, alors que celui du diesel est de 0,75 euro/l ce qui correspond à une consommation de 4,6 l/100 km et une dépense en carburant de 3,5 euros pour 100 km. (Beeker, 2014)

De même que les infrastructures à hydrogène, les coûts des véhicules électriques à PAC sont également élevés. En 2014, le prix de commercialisation des véhicules de certaines firmes comme Toyota ou BMW était d'environ 50 000 euros (Beeker, 2014). Ainsi, le développement de la filière hydrogène sur un territoire donné nécessitera des investissements de grande envergure en ce qui a trait au déploiement des infrastructures à hydrogène et un engagement stratégique de la part des acteurs gouvernementaux ainsi que de ceux du secteur automobile afin de rendre compétitive la filière hydrogène.

- Développement d'un nouveau marché

Le développement d'un nouveau marché associé à la filière hydrogène représente un atout majeur pour l'économie de la plupart des pays qui se sont engagés dans cette filière. Selon les prévisions de l'étude

prospective réalisée en France en 2018 dénommée « Développons l'hydrogène pour l'économie française », le développement de la filière hydrogène en France permettrait, à l'horizon 2030, de créer un marché qui représenterait plus « de 8 à 9 milliards d'euros de chiffre d'affaires annuel potentiel pour l'hydrogène et ses applications sur le marché français », en plus de 6 à 7 milliards d'euros de recettes associées aux « exportations potentielles d'équipements, de composants et de matériaux ». (AFHYPAC, 2018d)

À l'horizon 2050, ce marché « représenterait environ 20 à 25 milliards d'euros et n'emploierait pas moins de 150 000 personnes » (AFHYPAC, 2018d). Par ailleurs, la mobilité hydrogène en France, grâce à l'inclusion des externalités associées aux coûts sociétaux des émissions de GES, des polluants atmosphériques et des nuisances sonores, permettra de réaliser une économie d'environ 500 millions d'euros sur la période 2015-2030 (AFHYPAC, 2014).

Enfin, dans une perspective de déploiement de la filière hydrogène à l'échelle mondiale, des « investissements de 20 à 25 milliards de dollars par an jusqu'en 2030 pourraient générer 2500 milliards de dollars de revenus et créer plus de 30 millions d'emplois dans le monde en 2050 » (AFHYPAC, 2017).

## **6. ANALYSE**

L'objectif de ce chapitre est de présenter la méthode d'analyse utilisée, les critères et leur mode d'évaluation ainsi que les résultats et analyses associés.

### **6.1 Méthodologie de l'analyse multicritère**

#### **6.1.1 Choix de la méthode**

Afin de répondre au questionnement de la problématique de l'essai, soit l'analyse de l'usage de l'hydrogène comme carburant alternatif au Québec dans un contexte de développement durable (DD), il a été opportun d'opter pour le choix d'un outil d'évaluation de projet qui intègre au mieux les différentes dimensions du DD. L'approche escomptée dans le contexte de l'essai n'est pas de réaliser l'évaluation de la performance de plusieurs variantes de projets dans un contexte de DD et de choisir celle qui présente la meilleure performance, mais plutôt d'évaluer la compatibilité d'une seule variante, en l'occurrence « l'usage de l'hydrogène dans le transport », avec le DD.

Parmi les différents outils d'analyse de projets existants, dans un contexte de DD, le choix a été porté sur la grille d'analyse dénommée « 35 questions pour une réflexion plus large sur le développement durable », réalisée par des chercheurs de la Chaire en écoconseil de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). En effet, cette grille traite de plusieurs grands enjeux associés au DD qui comprennent notamment : « la lutte contre la pauvreté, la santé, l'éducation, l'accès aux biens et services, la biodiversité, la lutte [contre les] changements climatiques, etc. ». Elle se compose de six tableaux regroupant les dimensions : éthique, écologique, sociale, économique, culturelle et gouvernance du DD, auxquelles sont associées des questions pertinentes qui servent de critères d'évaluation du projet en lien avec les principes du DD. Ainsi, cette grille a pour principal objectif de faciliter l'orientation de la réflexion sur « les multiples impacts des [projets], et de proposer des [solutions] concrètes pour améliorer la prise en compte de questions relatives au DD ». (Villeneuve et coll., 2014a)

Par ailleurs, la grille permet également, dans le cadre de l'analyse de la problématique d'un projet, « d'élargir les représentations des acteurs et améliorer [le projet] par la prise en compte d'éléments nouveaux » (Villeneuve et coll., 2014a).

#### **6.1.2 Identification et pondération des critères**

Les critères de la grille ont été préalablement définis sous la forme de questions pertinentes associées à chacune des six dimensions du DD présentées dans le chapitre précédent. Ainsi, un total de 35 critères a été établi par les auteurs de la grille (voir annexe 2). Par ailleurs, il est important de préciser que, pour chacune des six dimensions du DD, la pondération associée à chaque critère a été réalisée sur la base de la

réponse à la question suivante : « [ce critère concerne-t-il] un élément indispensable, nécessaire ou seulement souhaitable pour le succès du projet ? ». (Villeneuve et coll., 2014a) Ainsi, l'importance à accorder à chaque réponse, pour chacun des 35 critères, a été associée à des valeurs numériques de 1 à 3. Ces valeurs numériques sont décrites comme suit (Villeneuve et coll., 2014a) :

- 1 (souhaitable) : une réponse positive à la question n'est pas jugée importante. Elle est jugée non prioritaire;
- 2 (nécessaire) : une réponse positive à la question est importante, mais ne figure pas parmi les priorités immédiates en lien avec les besoins visés par le projet;
- 3 (indispensable) : une réponse positive à la question est importante et figure parmi les priorités immédiates. Elle est jugée indispensable au succès et à la réalisation du projet.

Les tableaux A.2.1, A.2.2, A.2.3, A.2.4, A.2.5 et A.2.6, à l'annexe 2, présentent les différents critères (35 au total) associés à chacune des dimensions : éthique, écologique, sociale, économique, culturelle et gouvernance du DD. De plus, la pondération associée à chaque critère a été faite en fonction de l'importance de chaque critère dans le cadre de ce projet. Ainsi, la valeur numérique (1, 2 ou 3) relative à l'importance accordée à chaque question a été déterminée dans la case correspondante de la grille dans chacun des tableaux.

L'annexe 3 présente également un complément d'information sur les 35 questions faisant référence aux critères de la grille d'analyse. Il est fait mention de quelques détails sur la signification de chacune des questions (ou critères) ainsi que des objectifs de DD en lien avec chacun des critères (Villeneuve et coll., 2014a).

### **6.1.3 Évaluation des critères**

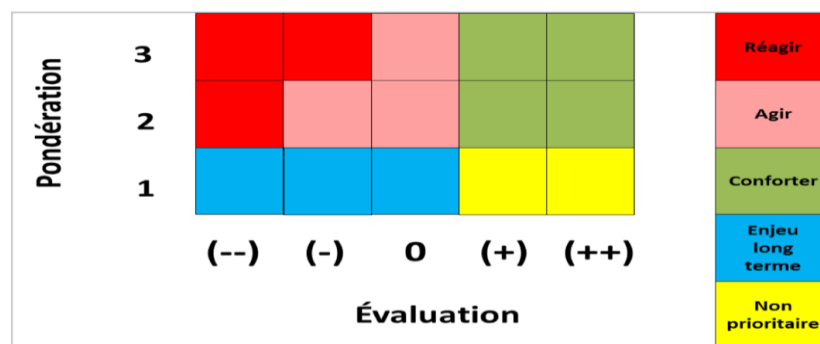
L'étape de l'évaluation de chacun des critères consiste à mener une réflexion relative à la contribution du projet vis-à-vis de chacune des questions posées dans la grille. Pour faciliter une harmonisation de la nomenclature des réponses associées à cette évaluation, les auteurs de la grille ont élaboré une charte de réponses, comprenant cinq réponses possibles, présentées dans le tableau 6.1.

**Tableau 6.1 Réponses possibles associées à l'évaluation des critères** (modifié de : Villeneuve et coll., 2014a).

Réponses	Description
--	Le projet a des impacts négatifs ou délétères, potentiellement importants, relativement à cette question.
-	C'est une question dont le projet n'a pas tenu compte. Il pourrait y avoir des impacts négatifs relativement à cette question, mais ils n'ont été ni mesurés ni évalués.
0	Le projet n'a pas d'impact significatif, ni positif, ni négatif.
+	Le projet répond positivement à cette question, mais sans se démarquer outre mesure d'autres projets semblables. C'est une question considérée, mais à laquelle il est possible de suggérer des améliorations.
++	Le projet se démarque par son innovation et par l'ampleur de sa prise en compte de cette question dans les choix effectués.

Afin de justifier les réponses attribuées aux différentes questions, dans le cadre de l'évaluation des critères, il est important d'indiquer dans les cases appropriées de la grille d'analyse les actions actuelles et futures identifiées dans le cadre de ce projet, puis de proposer des pistes de bonification au regard des actions ou mesures entreprises dans le cadre de projets similaires réalisés dans d'autres pays. La proposition de pistes de bonification « vise à maximiser les effets positifs et à atténuer les effets négatifs du projet à l'égard des aspects couverts par le DD ». (Villeneuve et coll., 2014a)

Par ailleurs, à la suite des étapes de pondération et de l'évaluation des critères, les tableaux de la grille d'analyse génèrent automatiquement un indice de priorisation. « Cet indice vise à déterminer les questions sur lesquelles la priorité devrait être mise afin d'améliorer la performance du projet en termes de DD ». (Villeneuve et coll., 2014a) Ainsi, une charte de couleurs permet de hiérarchiser les critères (ou les questions) selon une plage de priorisation qui permet d'identifier les questions sur lesquelles il faut « Réagir » et « Agir » par la proposition de pistes de bonification. La figure 6.1 présente l'indice de priorisation.

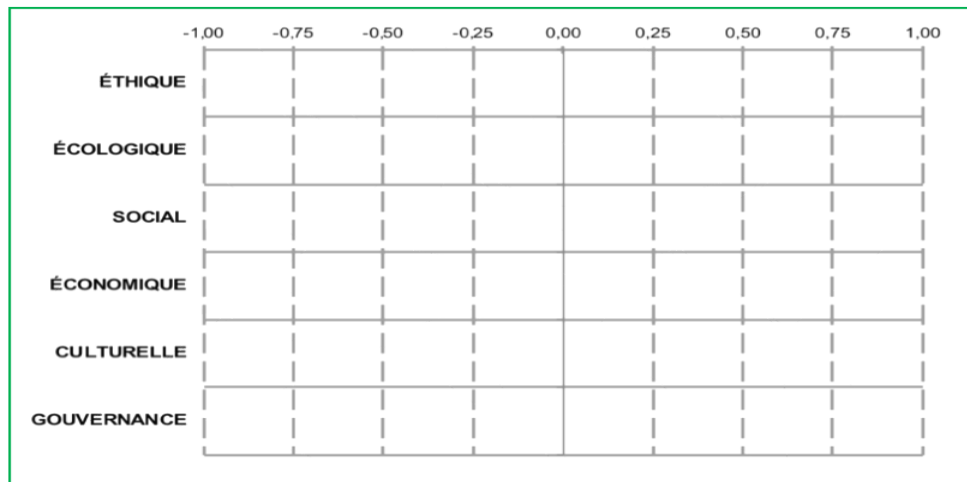


**Figure 6.1 Indice de priorisation** (tiré de : Villeneuve et coll., 2014a, p.4).

Le mécanisme de priorisation des questions de la grille d'analyse procède de la situation selon laquelle plus une « question est jugée importante (pondération élevée) et peu performante (évaluation faible), plus il sera urgent de mettre en œuvre des mesures d'amélioration (pistes de bonification) pour celle-ci » (Villeneuve et coll., 2014a). Ainsi, dans le cadre de ce projet, l'identification de pistes de bonification serait obligatoire pour les questions indiquant une priorisation « Agir » et « Réagir ».

#### 6.1.4 Évaluation de la performance

L'évaluation de la performance globale du projet au regard de chaque dimension du DD permet de comparer la performance entre les différentes dimensions. Les auteurs de la grille d'analyse ont établi des seuils de performance, dont la valeur est comprise entre -1 et 1, qui permettent de mesurer de manière qualitative la performance d'un projet dans un contexte de DD. (Villeneuve et coll., 2014b) La figure 6.2 présente le graphique de performance générale en fonction des différentes dimensions du DD.



**Figure 6.2 Graphique de performance générale** (tiré de : Villeneuve et coll., 2014b).

L'appréciation qualitative de la performance d'une dimension du DD se décrit comme suit :

- De 0,6 à 1 : Dimension affectée très positivement par le projet;
- De 0,2 à 0,6 : Dimension affectée positivement par le projet;
- De -0,2 à 0,2 : Dimension faiblement affectée par le projet;
- De -0,6 à -0,2 : Dimension affectée négativement par le projet;
- De -1 à -0,6 : Dimension affectée très négativement par le projet. (Villeneuve et coll., 2014b)

Selon les auteurs de la grille d'analyse de DD, un projet « voulant s'inscrire dans une démarche de DD devrait atteindre un seuil minimal de -0,2 sur l'ensemble des 6 dimensions de la grille ». Par ailleurs, les projets dont l'une des dimensions atteint une performance en dessous de -0,2 « ont peu de chance de réussir dans la voie du DD ». (Villeneuve et coll., 2014b)

## 6.2 Résultats

Les résultats de l'analyse de la problématique de l'essai sont présentés au niveau des six tableaux regroupant les dimensions : éthique, écologique, sociale, économique, culturelle et gouvernance de la grille d'analyse de DD.

- Dimension éthique

Dimension éthique					
Répondre aux questions d'équité, de justice, de solidarité, de cohérence					
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification
					Priorité
1	Favorise la réduction de la pauvreté en s'occupant du sort des plus démunis, pour satisfaire aux besoins du plus grand nombre ?	1	(-)	N.A	Enjeu long terme
2	Favorise la solidarité, l'engagement et l'assistance mutuelle entre des personnes ou des groupes ?	1	(-)	N.A	Enjeu long terme
3	Favorise la restauration des sites dégradés et la juste compensation pour les personnes touchées par les impacts négatifs d'un projet ?	1	(-)	N.A	Enjeu long terme
4	Favorise la recherche de solutions originales et de nouvelles façons de faire ?	3	(++)	<p>1. Le développement de la filière hydrogène a été initié par le gouvernement du Québec au début des années 1980, avec un accent particulier mis sur la prise d'initiatives dans le domaine de la recherche et le développement, associé aux technologies de l'hydrogène et des PAC. (ANQ, 2005)</p> <p>2. Plusieurs organismes de recherches québécois (dont l'IRH-UQTR, IREQ, INRS-ÉMT, etc.) ont, par l'intermédiaire de plusieurs projets, développé une expertise dans le domaine de l'électrification des transports et prouvé ainsi que le stockage et le transport de l'hydrogène ainsi que son utilisation dans le transport en commun en milieu urbain, étaient sécuritaires et réalisables. (ANQ, 2005)</p> <p>3. Plusieurs projets ont atteint leur maturité aujourd'hui dans les régions nordiques non connectées au réseau de distribution d'Hydro-Québec, grâce à la mise en place du système de stockage de l'énergie éolienne couplé aux technologies d'électrolyseurs et des PAC, développés par la compagnie Tugliq Énergie. (Services Techniques et Commerciaux Mij inc., 2013 ; Tugliq Énergie, 2018)</p>	Conforter
5	Favorise l'identification de valeurs communes et permet d'orienter l'action en cohérence avec des valeurs ?	1	(-)	N.A	Enjeu long terme



- Dimension écologique

Dimension écologique						
Répondre aux besoins de qualité du milieu et de pérennité des ressources						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
6	Favorise l'utilisation des ressources renouvelables et assure les conditions de leur remplacement ?	3	(++)	<p>1. L'usage actuel des technologies des électrolyseurs, utilisant le procédé de l'électrolyse, permet de produire de l'hydrogène à partir d'une source d'énergie renouvelable (hydroélectricité, énergie éolienne, énergie solaire, biomasse et biogaz). (Kalinowski et Pastor, 2013)</p> <p>2. Une station-service à hydrogène, utilisant les technologies des électrolyseurs et des PAC, a été installée en 2012 sur le site de l'IRH afin de soutenir les recherches en lien avec l'utilisation des technologies de PAC dans la mobilité propre. (IRH – UQTR, s. d.a)</p> <p>3. Un organisme dénommé « Transition Énergétique Québec » a été créé en 2017 par le gouvernement québécois, dans le cadre du développement de la filière hydrogène, afin de favoriser les « activités d'innovation technologique en efficacité énergétique et en production et consommation d'énergies renouvelables » ainsi que le soutien de la « décarbonisation du transport ». (TEQ, 2018)</p>		Conforter
7	Favorise une utilisation judicieuse et rationnelle des ressources non renouvelables en tenant compte de leur caractère irremplaçable ?	3	(+)	<p>1. Le gouvernement québécois s'est fixé plusieurs objectifs à atteindre à l'horizon 2030 dans le cadre de sa nouvelle politique énergétique. Ce sont principalement : l'amélioration de 15 % de l'efficacité énergétique, la réduction de 40 % de la quantité de produits pétroliers consommés, l'augmentation de 25 % de la production totale d'énergies renouvelables et enfin l'augmentation de 50 % de la production de bioénergie au Québec. (Gouvernement du Québec, 2016)</p>		Conforter
8	Favorise une utilisation judicieuse et rationnelle de l'énergie, en minimisant les impacts de sa production, de sa distribution et de sa consommation ?	3	(++)	<p>2. Un organisme nommé « Transition Énergétique Québec » a été créé en 2017 par le gouvernement québécois, dans le cadre du développement de la filière hydrogène, afin de favoriser les « activités d'innovation technologique en efficacité énergétique et en production et consommation d'énergies renouvelables » ainsi que le soutien de la « décarbonisation du transport ». (TEQ, 2018)</p> <p>3. La production de l'hydrogène propre, grâce à la technologie des électrolyseurs et des PAC, permet d'intégrer efficacement les « énergies renouvelables dans le mix énergétique et les transports [en plus de] de l'optimisation du réseau électrique », tout réduisant l'empreinte carbone des secteurs des transports, de l'industrie et du bâtiment. (AFHPAC, 2014)</p>	<p>1. L'hydrogène peut contribuer à l'équilibre de la variation « intersaisonnière des réseaux électriques » grâce au stockage en grande quantité du surplus de production des sources d'énergies renouvelables, durant les périodes de faibles demandes, dans le réseau gazier et cela sur de longues durées afin de les rendre disponibles en fonction de la demande. (ADEME, 2018)</p>	Conforter

- Dimension écologique (suite)

Dimension écologique						
Répondre aux besoins de qualité du milieu et de pérennité des ressources						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
9	Limite les quantités de pollutions ou de déchets rejetés dans les écosystèmes ?	3	(++)	<p>1. L'utilisation des véhicules électriques à hydrogène contribue à réduire la pollution atmosphérique dans les centres urbains, à cause de l'absence d'émissions « d'oxydes d'azote, de gaz organique non méthanique, de monoxyde de carbone, de formaldéhyde, de matières particulaires [...] ainsi que du dioxyde de soufre » au niveau de ces véhicules. (MELCC, 2017)</p> <p>2. La réaction combinée de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air au niveau de la PAC d'un véhicule électrique à hydrogène ne génère que de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. (Bento, 2010 ; ADEME, 2011)</p> <p>3. La PAC associée aux véhicules électriques à hydrogène constitue « une solution technologique de rupture » qui permet de réduire les nuisances liées aux usages énergétiques dans le secteur du transport, principalement en milieu urbain. (ADEME, 2011) Elle permet de réduire considérablement le bruit environnemental (MELCC, 2017).</p> <p>4. L'usage des véhicules électriques à PAC à grande échelle au niveau du territoire français permettrait, à l'horizon 2050, de « réduire les polluants atmosphériques de plus de 70 000 tonnes d'oxyde d'azote [...] par an ». (AFHYPAC, 2018d)</p>		Conforter
10	Considère les impacts sur la biodiversité ?	1	(-)	N.A		Enjeu long terme
11	Favorise une utilisation optimale du territoire en fonction de la disponibilité des surfaces et des usages qui en sont faits ?	1	(-)	N.A		Enjeu long terme
12	Limite les rejets de polluants affectant globalement la biosphère ?	3	(++)	<p>1. L'hydrogène produit grâce à la technologie des électrolyseurs et à partir d'une source d'énergies renouvelables (hydroélectricité, solaire et éolien) peut se substituer aux énergies fossiles dans le secteur des transports, grâce à l'usage d'une PAC, et répondre aux défis actuels de changement climatique grâce à des réductions nettes d'émissions de GES.</p> <p>2. Selon le « plan de déploiement national des véhicules hydrogène » de la France, l'usage de l'hydrogène dans le transport permettra de réduire de 1,2 Mt les émissions de CO<sub>2</sub> (77 %) de ce secteur d'ici 2030 (AFHYPAC, 2014). Les prévisions à l'horizon 2050, en lien avec le déploiement de la filière hydrogène dans le monde, indiquent que « les solutions hydrogène déployées à grande échelle pourraient contribuer à hauteur de 20 % pour limiter le réchauffement climatique à 2 °C » (AFHYPAC, 2017).</p>	<p>1. L'hydrogène peut être utilisé en association avec les technologies de séquestration du CO<sub>2</sub> afin de produire « des matières premières [de synthèse] renouvelables pour l'industrie chimique, et créer ainsi, un moyen viable de recyclage du carbone ». (AFHYPAC, 2018)</p>	Conforter

- Dimension sociale

Dimension sociale						
Répondre aux besoins sociaux et aux aspirations individuelles						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
13	Favorise une amélioration de santé générale des populations ?	3	(++)	<p>1. Le caractère silencieux des moteurs des véhicules électriques à PAC permet de réduire les nuisances sonores associées à ces véhicules en comparaison des véhicules classiques à combustion interne qui eux, génèrent beaucoup de bruits. Ainsi, cela contribue à l'amélioration de la qualité de vie des populations, «notamment en milieu urbain et périurbain» (ADEME, 2011). La réduction des émissions de polluants atmosphériques, comme les particules, les oxydes d'azote et les composés organiques volatils, évitées grâce à l'usage des véhicules électriques à PAC permet de contribuer à l'amélioration de la qualité de l'air des centres urbains et d'éviter des coûts supplémentaires en matière de soins de santé de la population (MELCC, 2016b).</p> <p>2. Les polluants atmosphériques générés par les véhicules classiques à combustion interne ont des «impacts importants en matière de santé publique (maladies respiratoires, cardiovasculaires et cancers), particulièrement en zones urbaines» (MTES, 2017). Ainsi, « la valeur monétaire des impacts sanitaires associés aux polluants atmosphériques est estimée, pour le Québec, à près de 9,5 milliards de dollars » (MELCC, 2016b).</p> <p>3. En France, les maladies respiratoires et cardiovasculaires associées aux polluants atmosphériques émis par les véhicules classiques à combustion interne « occasionnent chaque année des coûts estimés [au minimum] entre 20 et 30 milliards d'euros pour la France métropolitaine » (MTES, 2017). Ainsi, le déploiement des technologies de l'hydrogène en France permettra de réduire les coûts des dépenses associées à la prise en charge des maladies respiratoires et cardiovasculaires, « en plus de contribuer à l'amélioration de la qualité de vie des citoyens » (MELCC, 2016b).</p>		Conforter
14	Limite les facteurs susceptibles de représenter des dangers pour la personne (criminalité, accidents, conditions de travail, milieu de vie, mobilité, alimentation, etc.) ?	1	(-)	N.A		Enjeu long terme
15	Facilite l'accès à différents types de formation et permet aux individus d'atteindre le niveau de formation et compétence qu'ils désirent ?	1	(-)	N.A		Enjeu long terme

- Dimension sociale (suite)

Dimension sociale						
Répondre aux besoins sociaux et aux aspirations individuelles						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
16	Favorise l'intégration des individus à la société par une forme d'occupation valorisante ?	3	(++)	1. Selon le rapport réalisé par l'AFHYPAC en 2018, intitulé « Développons l'hydrogène pour l'économie française », le développement de la filière hydrogène en France permettra de générer aux horizons 2030 et 2050, respectivement 45 000 et 150 000 emplois (AFHYPAC, 2018d). Par ailleurs, le déploiement des solutions hydrogène à grande échelle dans le monde entier à l'horizon 2050 permettra de « créer plus de 30 millions d'emplois dans le monde » (AFHYPAC, 2017).		Conforter
17	Favorise un équilibre entre la liberté individuelle et la responsabilité de l'individu à l'égard de la collectivité ?	1	(-)	N.A		Enjeu long terme
18	Valorise l'accomplissement personnel et collectif ?	1	(-)	N.A		Enjeu long terme

- Dimension économique

Dimension économique					
Répondre aux besoins matériels					
Est-ce que le projet	Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures		Piste de bonification
19	Donne aux individus et aux collectivités la possibilité d'obtenir l'usage de biens et de capitaux ? 3	(+)	<p>1. L'usage des technologies de production de l'hydrogène, notamment les électrolyseurs couplés à des PAC, permet aux populations situées dans les zones éloignées non connectées au réseau électrique de stocker sur de longues périodes sous forme d'hydrogène le surplus d'électricité produite de manière intermittente à partir des sources d'énergies renouvelables (éolien, solaire et hydroélectricité) et assurer ainsi une autonomie énergétique. (ADEME, 2018)</p> <p>2. La compagnie québécoise Tugliq Énergie a développé un système de stockage d'hydrogène, dénommé « Boucle hydrogène », qui permet « de couper l'énergie renouvelable excédentaire de source éolienne et de la convertir en hydrogène par électrolyse. L'hydrogène converti peut ensuite subir le processus inverse pour produire de l'électricité » en fonction de la demande. Cette solution a été développée au Nunavik dans la mine Raglan permettant ainsi de réduire la facture énergétique de la compagnie minière. (Tugliq Énergie, 2018)</p> <p>3. Le développement de la filière hydrogène en France permettrait, à l'horizon 2030, de créer un marché qui représenterait plus « de 8 à 9 milliards d'euros de chiffre d'affaires annuel potentiel pour l'hydrogène et ses applications sur le marché français », en plus de 6 à 7 milliards d'euros de recettes associées aux « exportations potentielles d'équipements, de composants et de matériaux ». (AFHYPAC, 2018d)</p>		<p>1. Soutenir la production de l'hydrogène propre au Québec à travers l'exonération des installations de production d'hydrogène par électrolyse de toute taxation sur une certaine période ;</p> <p>2. Encourager les collectivités à favoriser, dans les administrations et entreprises publiques, le déploiement de solutions innovantes basées sur les technologies de l'hydrogène et des PAC ;</p> <p>3. Subventionner l'achat des véhicules électrique à hydrogène au Québec.</p>
20	Favorise la production et l'accès à des biens et services de la plus grande qualité possible ? 3	(-)			<p>1. Soutenir la filière hydrogène au Québec par le financement du déploiement d'un réseau d'infrastructures initiales afin de faciliter l'accès des populations aux stations-service à hydrogène ;</p> <p>2. Fédérer l'ensemble des acteurs de la filière hydrogène du Québec (gouvernement, industriels, PME, universités et centres de recherche) autour d'un programme cohérent de développement à moyen terme afin de développer des solutions compétitives sur l'ensemble de la chaîne de valeur de la filière hydrogène.</p>

- Dimension économique (suite)

Dimension économique						
Répondre aux besoins matériels						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
21	Favorise des changements dans les modes de production et de consommation en vue de les rendre plus viables et plus responsables sur les plans social et environnemental ?	3	(+)	<p>1. La production de l’hydrogène propre peut se faire actuellement à partir d’une source d’énergie renouvelable (hydroélectricité, énergie éolienne, énergie solaire, biomasse et biogaz) à l’aide de l’usage des technologies des électrolyseurs qui utilisent le procédé de l’électrolyse de l’eau. (Kalinowski et Pastor, 2013)</p> <p>2. La technologie des électrolyseurs et des PAC est «une innovation de rupture qui permet un saut qualitatif important en termes d’efficience dans la consommation d’énergie et réduction des émissions de CO<sub>2</sub>». (Bento, 2010)</p>	<p>1. La compagnie québécoise Hyteon, spécialisée dans la commercialisation des systèmes de cogénération résidentielle utilisant des PAC, a développé et breveté un système d’usage résidentiel de l’hydrogène couplé au PAC qui permet à la clientèle résidentielle de produire sa propre électricité ainsi que de subvenir à ses besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire. Ce système installé en Allemagne a par exemple permis à un client résidentiel « d’économiser environ 20 % sur sa facture énergétique soit 1000 dollars annuellement » et de réduire ses émissions de GES de plus d’une tonne eCO<sub>2</sub> par année. (MERN, 2013)</p> <p>2. Soutenir la production de l’hydrogène propre au Québec par l’exonération des installations de production d’hydrogène par électrolyse de toute taxation sur une certaine période ;</p> <p>3. Internaliser les avantages environnementaux de l’usage des véhicules électriques à hydrogène dans les couts de vente de ces véhicules.</p>	Conforter
22	Recherche la rentabilité dans une perspective de viabilité financière ?	3	(--)		<p>1. Soutenir la production de l’hydrogène propre au Québec par l’exonération des installations de production d’hydrogène par électrolyse de toute taxation sur une certaine période ;</p> <p>2. Soutenir les installations de production d’hydrogène par électrolyse au Québec en leur faisant bénéficier d’un accès à de l’électricité détaxée générée à partir d’une source d’énergie renouvelable afin de baisser le cout de production de l’hydrogène ;</p> <p>3. Soutenir la filière hydrogène au Québec par le financement du déploiement d’un réseau d’infrastructures initiales afin de faciliter l’accès des populations aux stations-service à hydrogène ;</p> <p>4. Soutenir la recherche et le développement au niveau des industries de fabrication des PAC afin de les rendre compétitives et favoriser le déploiement à grande échelle des véhicules électriques à hydrogène au Québec ;</p> <p>5. Subventionner l’achat des véhicules électrique à hydrogène au Québec.</p>	Réagir

- Dimension économique (suite)

Dimension économique						
Répondre aux besoins matériels						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
23	Permet d'améliorer la valeur des ressources et des biens qu'elle contribue à transformer ?	1	(-)	N.A		Enjeu long terme
24	Permet une juste redistribution de l'augmentation des richesses et des avantages pour le plus grand nombre ?	1	(-)	N.A		Enjeu long terme
25	Offre des conditions de travail acceptables et adéquates ?	3	(++)	1. Le déploiement des solutions hydrogène à grande échelle dans le monde entier à l'horizon 2050 permettra de « créer plus de 30 millions d'emplois dans le monde ». (AFHYPAC, 2017)		Conforter

- Dimension culturelle

Dimension culturelle						
Répondre aux besoins d'affirmation, d'expression, de protection et de mise en valeur de la diversité des traits culturels						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
26	Protège, met en valeur et favorise la transmission du patrimoine matériel et immatériel ?	1	(-)	N.A		Enjeu long terme
27	Encourage l'élargissement à la participation à la vie culturelle ?	1	0	N.A		Enjeu long terme
28	Favorise le dialogue entre et à l'intérieur des cultures ainsi que la diversité des formes d'expressions culturelles ?	1	0	N.A		Enjeu long terme
29	Développe un environnement structuré qui soutient les activités créatives culturelles ?	1	0	N.A		Enjeu long terme

- Dimension gouvernance

Dimension gouvernance						
Répondre aux besoins de participation, de démocratie, d'intégration et de transparence						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
30	Favorise l'utilisation d'outils et de processus qui permettent à l'organisation de prendre de meilleures décisions, de concevoir de meilleurs politiques, stratégies, programmes ou projets et d'améliorer leurs pratiques de gestion en matière de DD ?	1	(-)	N.A		Enjeu long terme
31	Reconnait et encourage la participation du plus grand nombre d'acteurs au processus de décision ?	3	(++)	1. Le consortium japonais « <i>Japan H2 Mobility LLC</i> », créé en 2018 pour favoriser le développement de la filière hydrogène au Japon, a permis de regrouper plusieurs acteurs des industries de l'automobile, des compagnies du secteur énergétique japonais ainsi que la Banque de Développement du Japon afin de collaborer tous ensemble au développement de la filière hydrogène. (MEF, 2018)  2. Plusieurs acteurs de la filière hydrogène du Québec, dont le gouvernement du Québec par l'intermédiaire de l'organisme TEQ, Hydro-Québec, Gaz Métro, Air-Liquide, Toyota Canada et Énergie Sonic (une Coop fédérée), se sont réunis afin de réaliser un projet pilote de stations multicarburant (essence, biocarburants, gaz naturel, propane, électricité et hydrogène) au Québec. Le projet pilote de station-service multicarburant sera par la suite étendu à l'échelle du Québec d'ici l'horizon 2030. Dans le cadre de la réalisation de ce projet pilote, la ville de Québec a été retenue comme lieu d'implantation de la première station-service multicarburant qui nécessitera un investissement total de 5,2 millions de dollars. (Gouvernement du Québec, 2018)		Conforter
32	Prévoit des mécanismes de suivi et d'évaluation de la prise en compte du DD ?	3	(-)		1. Soutenir, dans le cadre du projet de développement de la filière hydrogène au Québec, la mise en place de mesures de suivi et d'évaluation intégrant les principes du DD afin de mieux apprécier la qualité des actions mises en place.	Réagir



- Dimension gouvernance (suite)

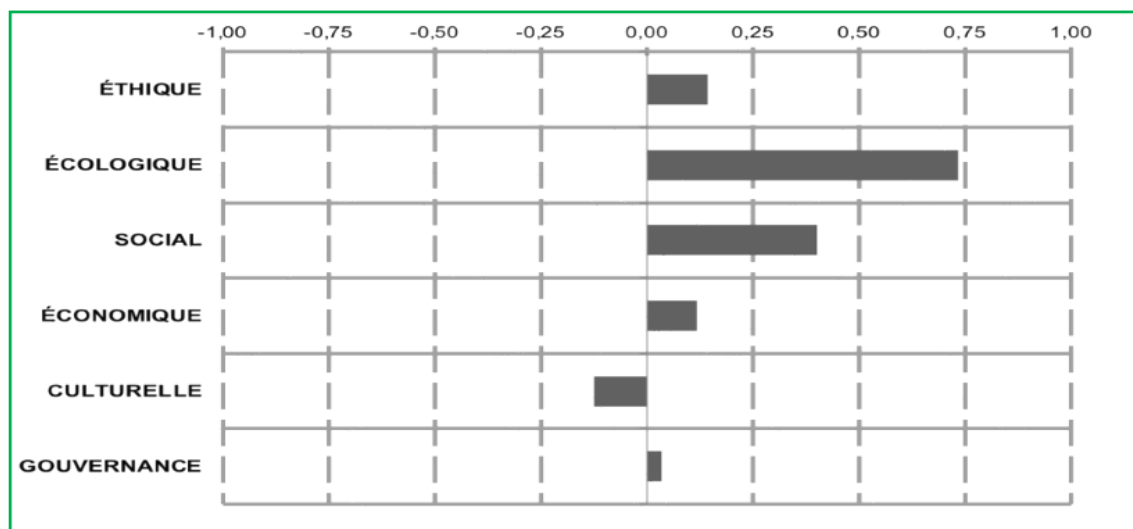
Dimension gouvernance						
Répondre aux besoins de participation, de démocratie, d'intégration et de transparence						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
33	S'intègre bien aux caractéristiques de la collectivité où il s'implante ?	3	(-)		<p>1. Soutenir la mise en place d'un cadre règlementaire adapté aux nouveaux usages de l'hydrogène en s'inspirant du modèle européen et américain ;</p> <p>2. Élaborer un référentiel technique qui encadre les processus de mise en place des nouvelles installations décentralisées de production et de distribution d'hydrogène par électrolyse ;</p> <p>3. Sensibiliser les populations sur les nombreux enjeux (environnement, sécurité énergétique, mobilité électrique, qualité de vie, santé, etc.) associés à l'usage de l'hydrogène afin de s'assurer de l'acceptabilité sociale du projet.</p>	Réagir
34	Rapproche le pouvoir d'action et de décision des personnes et des collectivités les plus concernées ?	1	(-)	N.A		Enjeu long terme
35	Favorise une gestion responsable des risques ?	3	(+)	<p>1. Plusieurs établissements d'enseignement et centres de recherche (IRH-UQTR, IREQ, INRA-ÉMIT, Hydrogen Link, etc.) québécois ont développé une expertise dans la chaîne de valeur de la filière hydrogène permettant ainsi de minimiser les risques liés à l'usage de l'hydrogène dans la mobilité électrique.</p>	<p>1. Élaborer un référentiel normatif et règlementaire, basé sur les normes internationales européenne et américaine, afin d'anticiper les risques qui pourraient subvenir : lors de la conception des véhicules électriques à hydrogène, lors du dimensionnement des infrastructures de recharge en hydrogène de la station-service ou du remplissage du réservoir des véhicules, lors de l'utilisation des véhicules par les usagers, lors des interventions dans le cadre des incidents ainsi que lors des phases de maintenance par les exploitants. (ADEME, 2015)</p>	Conforter

### 6.3 Analyse des résultats et de la performance générale

L'analyse des résultats se fera à partir du tableau de la grille d'analyse, remplie dans la section précédente, de chacune des six dimensions du DD. Le tableau 6.2 et la figure 6.3 présentent respectivement les valeurs et le graphique de performance globale de chacune des six dimensions de la grille d'analyse de DD relative au projet de l'usage de l'hydrogène pour l'alimentation des véhicules au Québec.

**Tableau 6.2 Valeurs de performance globale de chacune des six dimensions de DD** (modifié de : Villeneuve et coll., 2014b).

Analyse de l'usage de l'hydrogène pour l'alimentation des véhicules au Québec dans un contexte de DD	
Dimension	Note
Éthique	0,14
Écologique	0,74
Sociale	0,40
Économique	0,12
Culturelle	-0,13
Gouvernance	0,04



**Figure 6.3 Graphique de performance générale du projet** (modifié de : Villeneuve et coll., 2014b).

- Dimension éthique

Les résultats obtenus concernant la dimension éthique de la grille d'analyse de DD permettent de constater que le projet de l'usage de l'hydrogène pour l'alimentation des véhicules au Québec, dans son état actuel, intègre uniquement la prise en compte de l'enjeu de l'originalité et de l'innovation (question 4 de la grille d'analyse de DD) pour lequel le projet se démarque largement à travers une priorisation « Conforter », car

favorisant la mise en place d'actions en lien avec la recherche et le développement ainsi que l'innovation au niveau de la chaîne de valeur de la filière hydrogène. Plusieurs autres enjeux (questions 1, 2, 3 et 5 de la grille d'analyse de DD), dont la lutte contre la pauvreté, la solidarité, la restauration des écosystèmes, etc., n'ont pas été pris en compte par le projet. Cela est justifié par l'absence d'actions actuelles et futures relevées lors de la revue de la littérature en lien avec ce projet ou d'autres projets similaires. Leur priorisation a été qualifiée « Enjeu long terme », car ces enjeux ont été jugés non prioritaires au stade actuel du développement du projet. Ainsi, la performance globale de l'évaluation de la grille d'analyse de DD de la dimension éthique a obtenu une note de 0,14 sur une échelle de -1 à 1, indiquant que cette dimension est faiblement affectée par le projet. Par conséquent, elle est faiblement prise en compte dans le projet.

- Dimension écologique

La dimension écologique de la grille d'analyse de DD, au regard des résultats obtenus à la section 6.2, indique que le projet de l'usage de l'hydrogène pour l'alimentation des véhicules au Québec, dans son état actuel, intègre la prise en compte de plusieurs enjeux de DD. Ces enjeux (questions 6, 7, 8, 9 et 12 de la grille d'analyse de DD) comprennent principalement l'utilisation des ressources renouvelables et non renouvelables, l'usage judicieux de l'énergie et la réduction des polluants atmosphériques. Le projet se démarque largement à travers une priorisation « Conforter », pour l'ensemble de ces enjeux, car plusieurs actions actuelles et futures de certains projets similaires permettent de les justifier. C'est le cas par exemple de la France où, selon une étude, il est indiqué que l'usage des véhicules électriques à PAC à grande échelle au niveau du territoire français permettrait, à l'horizon 2050, de « réduire les polluants atmosphériques de plus de 70 000 tonnes d'oxyde d'azote [...] par an » (AFHYPAC, 2018d). De plus, l'usage de ce vecteur énergétique dans le transport permettra, à l'horizon 2030, de réduire de 1,2 Mt eCO<sub>2</sub> les émissions de CO<sub>2</sub> (77 %) dans ce secteur (AFHYPAC, 2014).

Par ailleurs, les prévisions à l'horizon 2050, en lien avec le déploiement de la filière hydrogène dans le monde, indiquent que « les solutions hydrogène déployées à grande échelle pourraient contribuer à hauteur de 20 % pour limiter le réchauffement climatique à 2 °C ». (AFHYPAC, 2017)

Il est bon d'indiquer que, parmi les enjeux de la dimension écologique de la grille d'analyse de DD, seulement deux (questions 10 et 11 de la grille d'analyse de DD) n'ont pas été pris en compte par ce projet ou les projets similaires. Ce sont principalement les enjeux de maintien de la biodiversité et l'utilisation optimale du territoire. Leur priorisation a été qualifiée « Enjeu long terme », car ces enjeux ont été jugés non prioritaires au stade actuel du développement du projet. Ainsi, la performance globale de l'évaluation de la grille d'analyse de DD de la dimension écologique a obtenu une note de 0,74 sur une échelle de -1 à

1, indiquant que cette dimension est affectée très positivement par le projet. Par conséquent, elle est fortement considérée dans le projet.

- Dimension sociale

La dimension sociale de la grille d'analyse de DD, au regard des résultats obtenus, indique que le projet intègre la prise en compte de deux enjeux majeurs (questions 13 et 16 de la grille d'analyse de DD) au niveau de cette dimension. Ces enjeux comprennent principalement la santé des populations et l'intégration des citoyens dans la société. La priorisation de ces enjeux a été évaluée à « Conforter », car plusieurs actions actuelles et futures de certains projets similaires permettent de les justifier. En effet, selon certaines études réalisées en France et au Québec, il est noté que l'usage des véhicules électriques à PAC permettrait de réduire à la fois les nuisances sonores en milieu urbain et périurbain ainsi que les émissions de polluants atmosphériques, comme les particules, les oxydes d'azote et les composés organiques volatils. Cela contribuait ainsi à l'amélioration de la qualité de vie des populations ainsi que la qualité de l'air des centres urbains en évitant des coûts supplémentaires en matière de soins de santé de la population. (ADEME, 2011; MELCC, 2016b) Au Québec, par exemple, « la valeur monétaire des impacts sanitaires associés aux polluants atmosphériques est estimée, à près de 9,5 milliards de dollars » (MELCC, 2016b). En France, les maladies respiratoires et cardiovasculaires associées aux polluants atmosphériques émis par les véhicules classiques à combustion interne « occasionnent chaque année des coûts estimés [au minimum] entre 20 et 30 milliards d'euros pour la France métropolitaine » (MTES, 2017). Enfin, il est noté que le déploiement des solutions hydrogène à grande échelle dans le monde entier à l'horizon 2050 permettra de « créer plus de 30 millions d'emplois dans le monde » (AFHYPAC, 2017). Ainsi, ces emplois contribueront à favoriser l'épanouissement personnel des citoyens ainsi que leur engagement envers la communauté (Villeneuve et coll., 2014b).

Plusieurs autres enjeux (questions 14, 15, 17 et 18 de la grille d'analyse de DD), dont la recherche de conditions de sécurité, l'éducation des populations et la reconnaissance des personnes et des investissements, n'ont pas été pris en compte par le projet. Cela est justifié par l'absence d'actions actuelles et futures relevées lors de la revue de la littérature en lien avec d'autres projets similaires. Leur priorisation a été qualifiée « Enjeu long terme », car ces enjeux ont été jugés non prioritaire au stade actuel du développement du projet. Ainsi, la performance globale de l'évaluation de la grille d'analyse de DD de la dimension éthique a obtenu une note de 0,40 sur une échelle de -1 à 1, indiquant que cette dimension est affectée positivement par le projet. Par conséquent, elle est prise en compte dans le projet.

- Dimension économique

La dimension économique de la grille d'analyse du DD, à travers les résultats obtenus, indique la prise en compte par le projet de trois enjeux majeurs (questions 19, 21 et 25 de la grille d'analyse de DD). Ces enjeux comprennent principalement la disponibilité des biens et des capitaux, la production et consommation responsable ainsi que l'amélioration des conditions de travail de la population. La priorisation de ces enjeux a été évaluée comme « Conforter », car des actions actuelles et futures de ce projet, ou certains projets similaires, permettent de les justifier. Le cas par exemple du système de stockage d'hydrogène développé par la compagnie québécoise Tugliq Énergie a déjà été expérimenté au Nunavik, au niveau de la mine Raglan, où il a permis de réduire de manière considérable la facture énergétique de cette compagnie minière (Tugliq Énergie, 2018). Ainsi, l'usage des technologies hydrogène permettrait aux populations situées dans les zones éloignées, par exemple la zone nordique québécoise non connectée au réseau électrique urbain, de stocker sur de longues périodes sous forme d'hydrogène le surplus d'électricité produite de manière intermittente à partir d'une source d'énergie renouvelable. L'hydrogène converti peut ensuite subir le processus inverse pour produire de l'électricité en fonction de la demande et favoriser ainsi l'atteinte d'une autonomie énergétique pour ces populations. (ADEME, 2018) Par ailleurs, le déploiement à grande échelle des solutions hydrogène dans le monde entier permettrait à l'horizon 2050 de « créer plus de 30 millions d'emplois dans le monde » (AFHYPAC, 2017). De plus, en France par exemple à l'horizon 2030, il permettrait de créer un marché de l'hydrogène qui représenterait plus « de 8 à 9 milliards d'euros de chiffre d'affaires annuel potentiel » (AFHYPAC, 2018d).

Cependant, il est bon d'indiquer que, parmi les enjeux de la dimension économique de la grille d'analyse de DD, deux (questions 20 et 22 de la grille d'analyse de DD) ont été évalués avec une priorisation « Réagir ». Ces enjeux comprennent principalement l'enjeu de la qualité des biens et services ainsi que celui de la viabilité financière, jugés indispensables au succès et à la réalisation du projet, mais pour lesquels aucune action actuelle ou future n'a été réalisée. Ainsi, plusieurs pistes de bonification ont été suggérées afin que le projet tienne compte de ces enjeux dans un contexte de DD. Il s'agit par exemple de l'exonération des installations de production d'hydrogène par électrolyse de toute taxation sur une période bien définie, du soutien par le gouvernement québécois du coût de production de l'hydrogène par électrolyse à travers l'accès à de l'électricité détaxée générée à partir d'une source d'énergie renouvelable, du financement par le gouvernement québécois du déploiement d'un réseau d'infrastructures initiales afin de faciliter l'accès des populations aux stations-service à hydrogène, de l'internalisation des avantages environnementaux de l'usage des véhicules électriques à PAC dans leur prix de vente, etc.

Enfin, deux autres enjeux, en l'occurrence la création et l'opportunité de partage de richesse, qui correspondent aux questions 23 et 24 de la grille d'analyse de DD, n'ont pas été pris en compte par le projet. Leur priorisation a été qualifiée comme « Enjeu long terme », car ils ont été jugés non prioritaires au stade actuel du développement du projet. Ainsi, la performance globale de l'évaluation de la grille d'analyse de DD de la dimension économique a obtenu une note de 0,12 sur une échelle de -1 à 1, indiquant que cette dimension est faiblement affectée par le projet. Par conséquent, elle est faiblement prise en compte dans le projet.

- Dimension culturelle

La dimension culturelle de la grille d'analyse de DD, en ce qui concerne les résultats obtenus, indique que tous les enjeux de cette dimension (questions 25, 27, 28 et 29 de la grille d'Analyse de DD), en l'occurrence la transmission du patrimoine culturel, les pratiques culturelles et artistiques, la diversité de l'offre culturelle et la contribution de la culture au développement économique, n'ont pas été pris en compte par le projet. Cela est justifié par l'absence d'actions actuelles et futures relevées lors de la revue de la littérature en lien avec ce projet ou d'autres projets similaires. Leur priorisation a été qualifiée « Enjeu long terme », car ces enjeux ont été jugés non prioritaires au stade actuel du développement du projet. Ainsi, la performance globale de l'évaluation de la grille d'analyse de DD de la dimension culturelle a obtenu une note de -0,13 sur une échelle de -1 à 1, indiquant que cette dimension est faiblement affectée par le projet. Par conséquent, elle est faiblement prise en compte dans le projet.

- Dimension gouvernance

La dimension gouvernance de la grille d'analyse du DD, à travers les résultats obtenus, indique la prise en compte par le projet de deux enjeux majeurs (questions 31 et 35 de la grille d'analyse de DD). Ces enjeux comprennent la participation des acteurs et la gestion du risque. La priorisation de ces enjeux a été évaluée comme « Conforter », car des actions actuelles et futures de ce projet, ou certains projets similaires, permettent de les justifier. Au Québec, par exemple, la participation des acteurs au développement de la filière hydrogène s'est matérialisée dans le cadre du projet pilote de réalisation de stations multicarburant (essence, biocarburants, gaz naturel, propane, électricité et hydrogène) qui a vu la participation de plusieurs acteurs de la filière hydrogène, dont le TEQ, Hydro-Québec, Gaz Métro, Air-Liquide, Toyota Canada et Énergie Sonic. Ainsi, une première station-service multicarburant, d'un investissement total de 5,2 millions de dollars, est en cours de réalisation dans la ville de Québec, et plusieurs autres sont prévues à l'échelle du Québec d'ici l'horizon 2030. (Gouvernement du Québec, 2018) De plus, il est bon d'indiquer que le Québec possède plusieurs établissements d'enseignement et centre de recherche (IRH-UQTR, IREQ, INRA-ÉMIT, Hydrogen Link, etc.) qui ont développé une expertise dans la chaîne de

valeur de la filière hydrogène permettant ainsi de minimiser les risques liés à l'usage de l'hydrogène dans la mobilité électrique. Au Japon également, un consortium dénommé « Japan H2 Mobility LLC » a été créé 2018, regroupant plusieurs acteurs des industries de l'automobile, des compagnies du secteur énergétique japonais ainsi que la Banque de Développement du Japon, afin de collaborer tous ensemble au développement de la filière hydrogène (MEF, 2018). Ce type d'action contribue à favoriser le développement de partenariats, l'engagement et la mobilisation des parties prenantes ainsi que l'instauration d'une vision concertée du développement de la filière hydrogène (Villeneuve et coll., 2014a).

Bien que ces deux enjeux soient valorisés par le projet, il est important d'indiquer que, parmi tous les enjeux de la dimension gouvernance de la grille d'analyse de DD, deux (questions 32 et 33 de la grille d'analyse de DD) ont été évalués avec une priorisation « Réagir », tandis que deux autres (questions 30 et 34 de la grille d'analyse de DD) avaient une priorisation évaluée comme « Enjeu long terme », car jugés non prioritaires au stade actuel du développement du projet. Les enjeux priorisés « Réagir » comprennent principalement l'enjeu de suivi et évaluation des actions ainsi que celui de l'intégration du projet dans la collectivité. Ces enjeux ont été jugés indispensables, mais malheureusement aucune action actuelle ou future n'a été réalisée dans le cadre du projet. Ainsi, des pistes de bonification ont été suggérées dans le but de favoriser la prise en compte de ces enjeux dans ce projet et améliorer ainsi la performance du projet en termes de DD. Il s'agit principalement :

- de la mise en place d'un cadre réglementaire et normatif (inspiré du modèle européen et américain) adapté aux nouveaux usages de l'hydrogène au Québec;
- de l'élaboration d'un référentiel technique qui encadre les processus de mise en place de nouvelles installations décentralisées de production et de distribution d'hydrogène au Québec;
- de la sensibilisation des populations à l'égard des nombreux enjeux (environnement, sécurité énergétique, mobilité électrique, qualité de vie, santé, etc.) associés à l'usage de l'hydrogène afin de s'assurer de l'acceptabilité sociale du projet;
- de la mise en place de mesures de suivi et d'évaluation intégrant les principes du DD afin de mieux apprécier la qualité des actions mises en place dans le cadre du projet.

En somme, la performance globale de l'évaluation de la grille d'analyse de DD de la dimension gouvernance a obtenu une note de 0,04 sur une échelle de -1 à 1, indiquant que cette dimension est faiblement affectée par le projet. Par conséquent, elle est faiblement prise en compte dans le projet.

## 7. POSITION ET RECOMMANDATIONS

La problématique de l'essai, en l'occurrence « l'usage de l'hydrogène pour l'alimentation des véhicules au Québec dans un contexte de DD », a été examinée à travers la grille d'analyse de DD dénommée « 35 questions pour une réflexion plus large sur le développement durable ». Cette grille oriente la réflexion sur les multiples enjeux de DD ainsi que les impacts associés à cette problématique. Elle permet d'énoncer des pistes de solutions concrètes afin d'améliorer la prise en compte de questions relatives au DD.

Ainsi, à la suite de l'analyse des résultats et de la performance globale de chacune des six dimensions de la grille d'analyse de DD, il ressort que le projet de l'usage de l'hydrogène dans les véhicules au Québec intègre fortement les enjeux de la dimension écologique ainsi que la prise en compte de ceux de la dimension sociale du DD. Cela se justifie au regard des performances respectives de 0,74 et 0,40 obtenues pour chacune de ces deux dimensions.

En effet, la problématique des changements climatiques, causée par les émissions de GES du secteur des transports du fait de l'usage des véhicules classiques utilisant des moteurs à combustion interne, nécessite la mise en place de mesures qui favoriseraient la réduction des GES dans l'atmosphère. Au Québec, le secteur des transports était responsable d'environ 43 % des émissions totales de GES en 2013 et, de plus, ce secteur comptait pour 70 % de la consommation totale des produits pétroliers utilisés à des fins énergétiques au Québec, en 2014. De plus, ce secteur contribue fortement à la dégradation de la qualité de l'air dans les centres urbains à cause des émissions de polluants atmosphériques (oxydes d'azote, gaz organique non méthanique, monoxyde de carbone, matières particulaires, dioxyde de soufre, etc.) qui ont des impacts importants en matière de santé publique en zones urbaines. Ainsi, ces polluants sont responsables des maladies respiratoires et cardiovasculaires ainsi que les cancers qui affectent les populations vivantes dans les grandes agglomérations québécoises. À cela s'ajoutent, également, les nuisances sonores occasionnées par l'usage des véhicules classiques qui impactent négativement la qualité de vie des populations québécoises. Au regard de tous ces impacts, la PAC associée aux véhicules électriques à hydrogène permet de réduire les nuisances liées aux usages énergétiques dans le secteur du transport en milieu urbain. Elle contribue à l'amélioration de la santé et de la qualité de vie des citoyens tout en contribuant au développement d'une mobilité propre à faibles émissions de GES.

Par ailleurs, la forte dépendance actuelle du secteur des transports urbains québécois à l'égard des sources d'énergies fossiles entraîne la vulnérabilité de ce secteur vis-à-vis de la sécurité d'approvisionnement du marché québécois. Face à ces enjeux de sécurité et de transition énergétiques, l'hydrogène propre produit à partir de la combinaison de la technologie des électrolyseurs et des sources électriques renouvelables (hydroélectricité, éolienne et solaire) est indispensable pour réussir la transition sur l'ensemble de la



chaîne de valeur de l'énergie au Québec. En effet, le Québec bénéficie d'un atout stratégique du fait de la place importante qu'occupent les énergies renouvelables dans son mix énergétique, soit 47 % (hydroélectricité : 35 %, biomasse : 7 %, éolien : 5 %) en 2015. Ainsi, l'usage des technologies des électrolyseurs et des PAC permet également d'augmenter la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique à travers le stockage de ces énergies sous la forme d'hydrogène. De plus, le développement de nouvelles applications de l'hydrogène, principalement dans le secteur industriel et celui du bâtiment, permettrait de diminuer la part des énergies fossiles et réduire ainsi l'empreinte carbone de ces secteurs au Québec.

Outre ces enjeux, il est bon d'indiquer que le développement de la filière hydrogène au Québec favoriserait le renforcement de la collaboration des différents acteurs impliqués dans la chaîne de valeur de la filière hydrogène en plus de contribuer à la création de nouveaux emplois au Québec.

Cependant, bien que les dimensions écologiques et sociales de la grille d'analyse de DD soient intégrées fortement dans le projet, il ressort également que le projet de l'usage de l'hydrogène dans les véhicules au Québec n'intègre pas suffisamment les quatre autres dimensions de la grille d'analyse de DD, en l'occurrence les dimensions éthique, économique, culturelle et de gouvernance. Cela se justifie au regard des performances respectives de 0,14, 0,12, -0,13 et 0,04 obtenues pour chacune de ces quatre dimensions. Le seuil minimum de performance globale de -0,13 obtenu sur l'ensemble des six dimensions de la grille d'analyse de DD indique que le projet dans sa globalité s'inscrit dans une démarche de DD. Néanmoins, il importe de préciser que des solutions de bonification, ou des recommandations doivent être entreprises afin d'améliorer la performance globale du projet en termes de DD.

En effet, à ce jour, les infrastructures de production et de distribution d'hydrogène décentralisé ne sont pas accessibles aux populations québécoises. En janvier 2018, le Québec ne comptabilisait qu'une seule station-service d'hydrogène sur son territoire, qui est située sur le site de l'Université du Québec à Trois-Rivières, et destinée à soutenir les activités de recherche de l'IRH. Par ailleurs, une station-service multicarburant (essence, biocarburants, gaz naturel, propane, électricité et hydrogène), d'un montant total de 5,2 millions de dollars, est présentement en cours de réalisation dans la ville de Québec. Trois autres stations identiques sont prévues dans les régions de Montréal, de l'Estrie et de l'Outaouais. Ainsi, malgré le déploiement projeté de ces futures infrastructures, force est de constater que le coût de réalisation demeure encore très élevé et constitue un facteur limitant au développement de la filière hydrogène au Québec. À titre de comparaison, en 2014, la construction d'une station-service à hydrogène en France coûtait environ 1,5 million d'euros, en plus du coût associé à la compression de l'hydrogène produit sur le site de la station-service qui est équivalent de 20 % du contenu énergétique de l'hydrogène distribué. Par

conséquent, le prix à la pompe de l'hydrogène se trouve plus élevé, environ 13 euros/kg H<sub>2</sub>, alors que celui du diesel est de 0,75 euro/L.

Ainsi, les quatre premières recommandations suivantes adressées au Gouvernement québécois découlent de la prise de position ci-haut. Elles permettraient d'accélérer la mise en place de la solution hydrogène.

- Première recommandation

Affirmer, au plus haut niveau, l'engagement gouvernemental à l'égard de l'importance stratégique que représente le vecteur énergétique hydrogène pour la réussite de la transition énergétique au Québec et soutenir fortement le développement d'une filière industrielle nationale.

- Deuxième recommandation

Fédérer l'ensemble des acteurs de la filière hydrogène du Québec (gouvernement, industriels, PME, universités et centres de recherche) autour d'un programme cohérent de développement à moyen terme afin d'établir des partenariats d'affaires et technologiques qui sont nécessaires au développement de solutions compétitives sur l'ensemble de la chaîne de valeur de la filière hydrogène et ainsi minimiser les risques industriels et économiques.

- Troisième recommandation

Soutenir le développement de la filière hydrogène au Québec à travers le financement du déploiement d'un réseau d'infrastructures initiales de niches dans les principales régions du Québec afin de faciliter l'accès des populations à ces niches de marché et favoriser ainsi progressivement à moyen terme la transition vers le développement de technologies hydrogène plus soutenable.

- Quatrième recommandation

Internaliser les avantages environnementaux de l'usage du vecteur énergétique hydrogène dans le coût de vente de l'hydrogène à la pompe afin de le rendre plus compétitif.

D'autre part, les coûts élevés des véhicules électriques à hydrogène, non accessibles à la classe moyenne de la population, constituent également une limite au développement de la filière hydrogène à cause des technologies des PAC embarquées. À ce niveau, les verrous à caractère technicoéconomique à lever sont l'intégration des composants en système, l'allongement de la durée de vie et l'amélioration de la fiabilité des piles, et la mise en œuvre de manière industrielle et économique des PAC. Ce faisant, les quatre recommandations suivantes visent à solutionner cette problématique.

- Cinquième recommandation

Soutenir la recherche et le développement au niveau des industries de fabrication des PAC afin de les rendre compétitives et favoriser à long terme le déploiement à grande échelle des véhicules électriques à hydrogène au Québec.

- Sixième recommandation

Soutenir la filière hydrogène à travers un investissement potentiel en démonstration réelle des applications des PAC (mobilité propre, chauffage des bâtiments, industrie), à travers des projets pilotes, afin de stimuler leur production et permettre ainsi de capitaliser des gains en apprentissage.

- Septième recommandation

Subventionner l'achat des véhicules électriques à hydrogène au Québec.

- Huitième recommandation

Subventionner l'achat des PAC pour la production électrique et le chauffage au niveau des bâtiments.

Outre les aspects liés aux coûts des véhicules électriques à hydrogène et des PAC, la présence de quelques contraintes à caractère socioéconomique, ont une incidence négative sur le développement de la filière hydrogène au Québec. La majorité des normes actuelles ont été élaborées dans un contexte d'application industrielle de l'hydrogène. Elles devraient être modulées, de sorte que le cadre réglementaire et normatif adapté intègre les nouveaux enjeux de production décentralisée par électrolyse, de transport et de stockage de l'hydrogène, associés aux nouvelles applications de l'hydrogène dans la mobilité propre. Ces nouvelles innovations d'ordre réglementaire, devraient également répondre aux appréhensions des populations vis-à-vis des risques d'incendie et d'explosion associés de manière générale à l'usage de l'hydrogène. Afin de solutionner cette problématique, les trois recommandations suivantes s'ajoutent.

- Neuvième recommandation

Élaborer un référentiel technique qui encadre les processus de mise en place des nouvelles installations décentralisées de production et de distribution d'hydrogène par électrolyse.

- Dixième recommandation

Sensibiliser davantage les populations sur les nombreux enjeux (environnement, sécurité énergétique, mobilité électrique, qualité de vie, santé, etc.) associés à l'usage de l'hydrogène afin de s'assurer de l'acceptabilité sociale du projet.

- Onzième recommandation

Élaborer un référentiel normatif et réglementaire, basé sur les normes internationales européenne et américaine, afin d’anticiper les risques qui pourraient subvenir lors de la conception des véhicules électriques à hydrogène, lors du dimensionnement des infrastructures de recharge en hydrogène de la station-service ou du remplissage du réservoir des véhicules, lors de l’utilisation des véhicules par les usagers, lors des interventions dans le cadre des incidents ainsi que lors des phases de maintenance par les exploitants.

De façon globale, pour maintenir une vision d’ensemble, une dernière recommandation serait pertinente pour assurer des suivis.

- Douzième recommandation

Enfin, dans le cadre de la mise en œuvre de toutes ces mesures, il est recommandé au Gouvernement québécois de procéder à la mise en place de mesures de suivi et d’évaluation intégrant les principes du DD afin de mieux apprécier la qualité des actions mises en place.

## CONCLUSION

L'objectif général du présent essai, qui était d'analyser dans une perspective de développement durable l'opportunité du choix du vecteur énergétique hydrogène comme source alternative pour l'alimentation des véhicules au Québec, a été atteint. Pour y arriver, il a été nécessaire dans le premier chapitre de présenter les spécificités de l'hydrogène ainsi que les risques et enjeux majeurs associés à son usage dans la mobilité électrique, ensuite de dégager le portrait de la situation des carburants de remplacement au Québec dans le deuxième chapitre. Par la suite, le portrait de la filière hydrogène de certains pays précurseurs, dont les États-Unis, le Japon, la France et l'Allemagne a été présenté en exemple dans le troisième chapitre, tout en mettant l'accent sur le cadre réglementaire et normatif existant dans ces pays. Le portrait de la situation de la filière hydrogène au Québec ainsi que les impacts économiques, sociaux et environnementaux associés à l'usage du vecteur énergétique hydrogène ont été ensuite présentés respectivement dans le quatrième et cinquième chapitre. Enfin, une grille d'analyse de DD réalisée par des chercheurs de la Chaire en écoconseil de l'UQAC a été utilisée dans le sixième chapitre afin d'examiner la problématique de l'essai, suivi de la proposition de quelques recommandations dans le chapitre 7.

Ce faisant, l'analyse réalisée au niveau du chapitre 6 a permis de démontrer que le projet de l'usage de l'hydrogène pour l'alimentation des véhicules au Québec intègre fortement les enjeux de la dimension écologique ainsi que la prise en compte de ceux de la dimension sociale du DD. C'est le cas notamment des enjeux liés à : l'utilisation des ressources renouvelables et non renouvelables, l'usage judicieux de l'énergie, la réduction des polluants atmosphériques et des GES, la santé et la qualité de vie des populations et enfin l'intégration des citoyens dans la société. Cependant, il n'intègre pas suffisamment les enjeux associés aux quatre autres dimensions de la grille d'analyse de DD, en l'occurrence les dimensions éthique, économique, culturelle et de gouvernance. Néanmoins, vue sous l'angle de sa globalité, l'analyse permet de conclure que le projet s'inscrit dans une démarche de DD.

Toutefois, il importe de préciser que les recommandations proposées au chapitre 7 devraient être entreprises afin d'améliorer la performance globale du projet en matière de DD, laquelle est nécessaire pour favoriser l'émergence et la mise en place d'une industrie durable de l'hydrogène au Québec. Cela passe nécessairement par un engagement stratégique au plus haut niveau de la part du gouvernement québécois, qui se doit dans un premier temps de soutenir la recherche, le développement et la démonstration des technologies de l'hydrogène et des PAC afin de les rendre compétitives. Par la suite, il doit élaborer un référentiel normatif et réglementaire, basé sur les normes internationales européennes et américaines, afin de minimiser les risques associés à l'ensemble de la chaîne de valeur de la filière hydrogène et ainsi diminuer les incertitudes sur les investissements. Ensuite, le gouvernement doit procéder à la mise place d'incitations fiscales afin de stimuler la demande et enfin, soutenir le financement

du déploiement d'un réseau d'infrastructures initiales de niches dans les principales régions du Québec afin de contribuer au développement de la demande et favoriser ainsi à moyen terme à la transition vers le développement de technologies hydrogène plus soutenables.

## RÉFÉRENCES

- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). (2011). *L'hydrogène énergie et les piles à combustible : Feuille de route stratégique*. Repéré à <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/hydrogene-energie-piles-combustibles-feuille-route-strategique-2011-6923.pdf>
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). (2015). *Guide d'information sur la sécurité des véhicules à hydrogène et des stations-service de distribution d'hydrogène*. Repéré à <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-securite-h2-vehicules-station-service-8506.pdf>
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). (2018). *Fiche technique : L'hydrogène dans la transition énergétique*. Repéré à [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique\\_hydrogene\\_dans\\_la\\_te\\_avril2018\\_2.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique_hydrogene_dans_la_te_avril2018_2.pdf)
- Agence Internationale de l'Énergie (AIE). (2017). *World Energy Outlook 2017: Résumé*. Repéré à [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO\\_2017\\_Executive\\_Summary\\_French\\_version.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO_2017_Executive_Summary_French_version.pdf)
- Agence Internationale de l'Énergie (AIE). (2018). *Global Energy & CO2 status report 2017*. Repéré à <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GECO2017.pdf>
- Air Liquide Canada (2018). Hydrogène : Air Liquide Canada propose plusieurs offres d'approvisionnement pour de nombreuses industries et applications. *Air Liquide, section Solutions – Gaz – Gaz industriels – Gaz-Hydrogène*. Repéré à <https://industrie.airliquide.ca/gaz-hydrogene>
- Assemblée nationale du Québec (ANQ). (2005). Pour la création d'une filière québécoise de l'hydrogène : mémoire déposé auprès de la Commission de l'économie et du travail dans le cadre de la consultation générale sur le secteur énergétique au Québec – contexte, enjeux et questionnements. *ANQ, section Travaux parlementaires – Économie et travail*. Repéré à <http://www.assnat.qc.ca/fr/travaux-parlementaires/commissions/CET/mandats/Mandat-3289/memoires-deposes.html>
- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC). (2014). *Mobilité hydrogène France : Proposition d'un plan de déploiement national des véhicules hydrogène*. Repéré à [http://www.afhypac.org/documentation/mobilite-h2-france/H2\\_Mobilite\\_France\\_FR.pdf](http://www.afhypac.org/documentation/mobilite-h2-france/H2_Mobilite_France_FR.pdf)
- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC). (2015). *Mémento de l'hydrogène : Fiche 7.1. Inflammabilité et explosivité de l'hydrogène*. Repéré à [http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche\\_7.1\\_inflammabilite\\_explosivite\\_rev\\_fev\\_2015\\_ineris\\_bwe\\_pm.pdf](http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_7.1_inflammabilite_explosivite_rev_fev_2015_ineris_bwe_pm.pdf)
- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC). (2016a). *Mémento de l'hydrogène : Fiches 4.1. Le transport d'hydrogène*. Repéré à <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%204.1%20-%20Transport%20hydrog%C3%A8ne%20-%20revmai2016ThA.pdf>

- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC). (2016b). *Mémento de l'hydrogène : Fiches 8.4. Les programmes hydrogène et piles à combustible aux USA*. Repéré à <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%208.4%20-%20Programmes%20aux%20USA%20rev.fev2016%20ThA.pdf>
- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC). (2016c). *Mémento de l'hydrogène : Fiches 7.3. La sécurité hydrogène en France, en Europe et dans le monde : Normes et règlements*. Repéré à <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%207.3%20-%20Normes%20et%20règlements%20rev.fev2016%20Th.pdf>
- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC). (2017). *L'hydrogène accélère en 2107*. Repéré à [http://www.afhypac.org/documents/divers/AFHYPAC\\_Hydrogene-accelere-2017\\_2017-12-04\\_low.pdf](http://www.afhypac.org/documents/divers/AFHYPAC_Hydrogene-accelere-2017_2017-12-04_low.pdf)
- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC). (2018a). *Mobilité hydrogène France : La France a son plan de déploiement d'une infrastructure et véhicules hydrogène*. Repéré à <http://www.afhypac.org/mobilite-hydrogene-france/>
- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC). (2018b). *Mémento de l'hydrogène : Fiche 8.2 - Programme allemand*. Repéré à <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%208.2%20-%20Programme%20allemand%20-%20rev%20janv2018%20ThA.pdf>
- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC). (2018c). *Inauguration du premier train à hydrogène d'Alstom*. Repéré à <http://www.afhypac.org/actualites/articles/inauguration-du-premier-train-a-hydrogene-d-alstom-1328/>
- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC). (2018d). *Développons l'hydrogène pour l'économie française : Étude prospective*. Repéré à [http://www.afhypac.org/documents/actualites/pdf/Afhypac\\_Etude%20H2%20Fce\\_VDEF.pdf](http://www.afhypac.org/documents/actualites/pdf/Afhypac_Etude%20H2%20Fce_VDEF.pdf)
- Association québécoise de la production d'énergie renouvelable (AQPER). (2017). *Recommandations de l'Association québécoise de la production d'énergie renouvelable (AQPER) dans le cadre de la consultation publique sur l'élaboration du plan directeur 2018-2023 en transition, innovation et efficacité énergétiques*. Repéré à <http://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/consultation/memoires/AQPER-10dec2017.pdf>
- Association des véhicules électriques du Québec (AVÉQ). (2018). *Médias : Statistiques au Québec*. Repéré à <http://www.aveq.ca/meacutedias.html>
- Audette, S. (2016). *Mandat de balisage, diagnostic, principes tarifaires et pistes de solutions pour le développement de la filière du gaz naturel renouvelable dans le contexte québécois*. Repéré à [http://publicsde.regie-energie.qc.ca/projets/374/DocPrj/R-3972-2016-A-0012-Rapports-Dec-2016\\_12\\_20.pdf](http://publicsde.regie-energie.qc.ca/projets/374/DocPrj/R-3972-2016-A-0012-Rapports-Dec-2016_12_20.pdf)
- Beeker, É. (2014). Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ?. *La note d'analyse*, (15), p.16. Repéré à <http://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/201-08-06na-fs-hydrogene-hd.pdf>



- Bento, N. (2010). *La transition vers une économie de l'hydrogène : infrastructures et changement technique* (Thèse de doctorat). Université Pierre Mendès-France - Grenoble II, France. Repéré à [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/48/026/48026205.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/48/026/48026205.pdf)
- California Energy Commission (CEC). (2017). *Joint Agency staff Report on Assembly bill 8: 2007 annual assessment of Time and cost needed to attain 100 hydrogen refueling stations in California*. Repéré à <http://www.energy.ca.gov/2017publications/CEC-600-2017-011/CEC-600-2017-011.pdf>
- Coalition France pour l'Efficacité Énergétique (CFEE). (s. d.). Lexique. Repéré à <https://www.coalition-energie.org/lexique-de-lefficacite-energetique/>
- Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies (CGEIET). (2016). *Quelle place et quelles perspectives pour l'industrie française dans les véhicules à nouvelles motorisations?* Repéré à [https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions\\_services/cge/Rapports/2018\\_01\\_05\\_Rapport\\_nouvelles\\_motorisations.pdf](https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/Rapports/2018_01_05_Rapport_nouvelles_motorisations.pdf)
- Commissariat à l'Énergie atomique et aux Énergies alternatives (CEA). (2018). *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique. Rapport à Monsieur le Ministre de la Transition Écologique et Solidaire*. Repéré à <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Rapport%20H2%20MTES%20CEA%200106.pdf>
- Commissariat général au développement durable (CGDD). (2018). *Chiffres clé du climat : France, Europe et Monde*. Repéré à [http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits\\_editoriaux/Publications/Datalab/2017/datalab-27-CC-climat-nov2017.pdf](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2017/datalab-27-CC-climat-nov2017.pdf)
- Commission Européenne (CE). (2017). *Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions : Parvenir à la plus large utilisation des carburants alternatifs - Plan d'action relatif à l'infrastructure pour carburants alternatifs en application de l'article 10, paragraphe 6, de la directive 2014/94/UE, comprenant l'évaluation des cartes d'action nationales au titre de l'article 10, paragraphe 2, de la directive 2014/94/UE*. Repéré à <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/FR/COM-2017-652-F1-FR-MAIN-PART-1.PDF>
- Commission Européenne (CE). (2018). *H2ME 2 Report Summary: Periodic reporting for period 1 – H2ME 2 (Hydrogen Mobility Europe 2)*. Repéré à [https://cordis.europa.eu/result/rcn/215203\\_en.html](https://cordis.europa.eu/result/rcn/215203_en.html)
- Énergir. (2016). *Gaz Métro : prête pour les défis à l'horizon 2030 – Fiche d'information*. Repéré à [https://www.energir.com/~media/Files/Corporatif/Fiches/Fiche\\_Innovation\\_avril2016.pdf?la=fr](https://www.energir.com/~media/Files/Corporatif/Fiches/Fiche_Innovation_avril2016.pdf?la=fr)
- Énergir. (2017a). *À propos : nos énergies : distribution de gaz naturel – Énergir est le principal distributeur de gaz naturel au Québec*. Repéré à <https://www.energir.com/fr/a-propos/nos-energies/gaz-naturel/gaz-naturel/>
- Énergir. (2017b). *À propos : développement durable : rapport de développement durable : chaîne de valeurs*. Repéré à <https://www.energir.com/fr/a-propos/developpement-durable/rapport-gri/chaine-de-valeurs/>

- Énergir. (2017c). *À propos : développement durable : rapport de développement durable : thématiques : approvisionnement gazier*. Repéré à <https://www.energir.com/fr/a-propos/developpement-durable/rapport-gri/thematiques/approvisionnement-gazier/>
- Énergir. (2017d). *À propos : médias : nouvelles : des capacités additionnelles de gaz naturel liquéfié (GNL) sont maintenant disponibles au Québec*. Repéré à <https://www.energir.com/fr/a-propos/medias/nouvelles/des-capacites-additionnelles-de-gnl-sont-maintenant-disponibles-au-quebec/>
- Énergir. (2017e). *À propos : nos énergies : gaz naturel : gaz naturel liquéfié : Une solution efficace pour lutter contre les changements climatiques*. Repéré à <https://www.energir.com/fr/a-propos/nos-energies/gaz-naturel/gaz-naturel-liquefie/>
- Énergir. (2017f). *Transport : technologie : gaz naturel pour véhicules – Deux types de gaz naturel pour véhicules (GNV) sont disponibles pour répondre à vos besoins*. Repéré à <https://www.energir.com/fr/transport/technologie/gnv/>
- Énergir. (2017g). *Transport : ravitaillement : la route bleue*. Repéré à <https://www.energir.com/fr/transport/ravitaillement/route-bleue/>
- Énergir. (2017h). *À propos : nos énergies : gaz naturel : gaz naturel comprimé*. Repéré à <https://www.energir.com/fr/a-propos/nos-energies/gaz-naturel/gaz-naturel-comprime/>
- Énergir. (2017i). *Gaz naturel pour véhicules : Deux types de gaz naturel pour véhicules (GNV) sont disponibles pour répondre à vos besoins. Énergir, section Accueil, Transport, Technologie, Gaz naturel pour véhicules*. Repéré à <https://www.energir.com/fr/transport/technologie/gnv/>
- Énergir. (2018). *Intégrer une station de ravitaillement en gaz naturel comprimé à votre bâtiment*. Repéré à [http://ashraemontreal.org/ashrae/data/files/pdf/presentations/bloc\\_3\\_integrer\\_une\\_station\\_de\\_ravitaillement\\_a\\_gnc\\_a\\_votre\\_batiment\\_dd\\_ashrae2018.pdf](http://ashraemontreal.org/ashrae/data/files/pdf/presentations/bloc_3_integrer_une_station_de_ravitaillement_a_gnc_a_votre_batiment_dd_ashrae2018.pdf)
- FPIInnovations (2018). Groupe PIT. *FPIInnovations, section Programmes de recherche – Groupe PIT*. Repéré à <https://fpinnovations.ca/ResearchProgram/the-pit-group/Pages/accueil.aspx>
- Gaz Métro. (2017). *Le GNR : levier clé de la transition énergétique*. Repéré à <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/ba/58/atelier6-rh-aume-dave.pdf>
- Gondor, G. (2008). *Pour le stockage de l'hydrogène : Analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métalliques et optimisation du remplissage d'un réservoir* (Thèse de doctorat). Université de Franche-Comté. Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00782271/document>
- Gouvernement du Canada (2013). *Chaire de recherche du Canada en matériaux énergétiques. Gouvernement du Canada, section Chaires de recherche du Canada, Titulaires de chaire, Daniel Guay*. Repéré à <http://www.chairs-chaire.gc.ca/chairholders-titulaires/profile-fra.aspx?profileId=3019>
- Gouvernement du Canada (2018). *Investir au Canada : Avantages concurrentiels du Canada*. Repéré à [http://www.international.gc.ca/investors-investisseurs/assets/pdfs/download/vp-technologies\\_propres.pdf](http://www.international.gc.ca/investors-investisseurs/assets/pdfs/download/vp-technologies_propres.pdf)

- Gouvernement du Québec. (2015). *Propulser le Québec par l'électricité : Plan d'action en électrification des transports 2015 – 2020*. Repéré à [https://transportselectriques.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/CIAO-050-LG2-MTQ-Rapport2016FRv2.1\\_.pdf](https://transportselectriques.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/CIAO-050-LG2-MTQ-Rapport2016FRv2.1_.pdf)
- Gouvernement du Québec. (2016). *L'énergie des québécois : source de croissance : politique énergétique 2030*. Repéré à <https://politiqueenergetique.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/politique-energetique-2030.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2018). *Budget 2018-2019 : Le Plan économique du Québec — mars 2018*. Repéré à [http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2018-2019/fr/documents/PlanEconometique\\_18-19.pdf](http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2018-2019/fr/documents/PlanEconometique_18-19.pdf)
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2013). *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs, résumé technique et foire aux questions*. Geneva, Switzerland : GIEC. Repéré à [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_FRENCH.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf)
- Hydrogen Mobility Europe (H2ME). (2018). *Hydrogen Mobility Europe is a Flagship project giving fuel cell electric vehicle (FCEV) drivers access to the first truly pan-european network of hydrogen refuelling stations*. Repéré à <https://h2me.eu/about/>
- Hydrogen Link (s. d.). Hydrogen storage – Hydrides. *Hydrogen Link, section Overview*. Repéré à <https://www.hydrogenlink.com>
- Hydro-Québec (2018a). Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ). *Hydro-Québec, section Accueil Hydro-Québec – Innovation technologique – L'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ)*. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/innovation/fr/institut-recherche.html>
- Hydro-Québec (2018b). Recherche-développement. *Hydro-Québec, Section Développement durable – Innovation technologique*. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/innovation-technologique/recherche-developpement.html>
- Hydro-Québec (2018c). Électrification des transports terrestres. *Hydro-Québec, section Accueil Hydro-Québec – Innovation technologique – Axes d'innovation*. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/innovation/fr/axes-innovation.html>
- Institut national de recherche scientifique (INRS). (2018). Chaires, groupes et réseaux de recherche. *INRS, section La recherche*. Repéré à <http://www.inrs.ca/recherche/chaieres-groupes-reseaux-recherche>
- Institut de recherche sur l'hydrogène – Université du Québec à Trois-Rivières (IRH - UQTR). (s. d.a). *L'histoire de l'IRH. IRH – UQTR, Section Historique*. Repéré à [https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/gscw031?owa\\_no\\_site=4337&owa\\_no\\_fiche=19&owa\\_bottin=](https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/gscw031?owa_no_site=4337&owa_no_fiche=19&owa_bottin=)
- Institut de recherche sur l'hydrogène – Université du Québec à Trois-Rivières (IRH - UQTR). (s. d.b). *La mobilité électrique. IRH – UQTR, Section Nos recherches*. Repéré à [https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/gscw031?owa\\_no\\_site=4337&owa\\_no\\_fiche=8&owa\\_bottin=](https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/gscw031?owa_no_site=4337&owa_no_fiche=8&owa_bottin=)

- Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS). (2016). *Étude comparative des réglementations, guides et normes concernant les électrolyseurs et le stockage d'hydrogène*. Repéré à <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/dra-71-benchmark-sur-les-electrolyseurs-et-stockage-hydrogene-vf-1469010848.pdf>
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2018). TC 105 – Technologies des piles à combustible. *Section IEC – Standards development – How we work – Comités d'Études & Sous-comités – TC 105 Tableau de bord*. Repéré à [https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:20:0:::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_LANG\\_ID:1309,34](https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:20:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1309,34)
- International Organization for Standardization (ISO). (s. d.). Catalogue de normes : ISO/TC 197 – Technologies de l'hydrogène. *ISO, section Participer – Qui élabore les normes – Comités techniques – ISO/TC 197*. Repéré à <https://www.iso.org/fr/committee/54560/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>
- Jamet, P. (2006). Aperçus sur l'énergie aux États-Unis. *Ambassade de France aux États-Unis – Mission pour la science et la technologie*. Repéré à [http://ecolo.org/documents/documents\\_in\\_french/US-energie-06.pdf](http://ecolo.org/documents/documents_in_french/US-energie-06.pdf)
- Kalinowski, L. et Pastor, J.-M. (2013). *Rapport au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques sur : L'hydrogène : vecteur de la transition énergétique ?*. Repéré à <http://www.assemblee-nationale.fr/14/cr-oecst/rapport-hydrogene.pdf>
- Les Échos (2018, 4 avril). Versailles Grand Parc se dote d'une station à hydrogène. *Les Échos*. Repéré à [https://www.lesechos.fr/04/04/2018/LesEchos/22669-357-ECH\\_versailles-grand-parc-se-dote-d-une-station-a-hydrogene.htm](https://www.lesechos.fr/04/04/2018/LesEchos/22669-357-ECH_versailles-grand-parc-se-dote-d-une-station-a-hydrogene.htm)
- Ministère de l'Environnement et la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2016a). *Norme VZE, Québec prend les devants*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/vze/feuille-vze-reglement.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2016b). *Analyse d'impact réglementaire du projet de loi visant l'augmentation du nombre de véhicules automobiles zéro émission au Québec afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et autres polluants*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/vze/air-projet-loi-vze201606.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2017). *Analyse d'impact réglementaire du règlement d'Application de la Loi visant l'augmentation du nombre de véhicules automobiles zéro émission au Québec afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et autres polluants*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/vze/AIR-reglement201712.pdf>
- Ministère de l'Économie et des Finances (MEF). (2017). *La stratégie de développement de l'hydrogène au Japon*. Repéré à <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2017/09/11/la-strategie-de-developpement-de-l-hydrogene-au-japon>
- Ministère de l'Économie et des Finances (MEF). (2018). *Actualités Japon – Énergie, Environnement, Transport, Construction*. Repéré à <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2018/03/14/actualites-japon-energie-environnement-transport-construction-mars-2018-i>

- Ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations (MEIE). (2011). Crénau ACCORD Hydrogène en Mauricie : Le gouvernement du Québec attribue 252 000 dollars à l'Université du Québec à Trois-Rivières pour assurer la mise en œuvre de la stratégie et du plan d'action du crénau d'excellence émergent ACCORD sur l'hydrogène. *MEIE, section, Salle de presse – Communiqué de presse*. Repéré à [https://www.economie.gouv.qc.ca/ministere/salle-de-presse/communiques-de-presse/communiquede-presse/?no\\_cache=1&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=5744&cHash=097b6d2f5e7a667f134078b07b07e4c9](https://www.economie.gouv.qc.ca/ministere/salle-de-presse/communiques-de-presse/communiquede-presse/?no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=5744&cHash=097b6d2f5e7a667f134078b07b07e4c9)
- Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique de la France (MEIN). (2015). *Filière hydrogène-énergie*. Repéré à [https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions\\_services/cge/Rapports/2016\\_05\\_03\\_Filiere\\_hydrogene\\_energie.pdf](https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/Rapports/2016_05_03_Filiere_hydrogene_energie.pdf)
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN). (s. d.). Bioénergie. *MERN, section Énergie – Innovation - Bioénergie*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/energie/innovation/bioenergie/>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN). (2004). *L'énergie au Québec*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/publications/energie/energie/energie-au-quebec-2004.pdf>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN). (2013). *Consultation publique sur les enjeux énergétiques du Québec : L'hydrogène et les piles à combustible, des composantes essentielles de la stratégie québécoise sur l'énergie – Présenté à la commission Publique sur les enjeux énergétiques du Québec, par Hyteon Inc.* Repéré à [https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20131008\\_292\\_Hyteon\\_M.pdf](https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20131008_292_Hyteon_M.pdf)
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN). (2015). *Politique énergétique 2016-2025*. Repéré à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2437477>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN). (2016). Politique énergétique 2030 – Le ministre Pierre Arcand donne le coup d'envoi au projet de stations multicarburants. *MERN, section Accueil – Actualités – Salle de presse – Communiqué de presse – Énergie*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/2016-10-03-politique-energetique-stations-multicarburants/>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN). (2018). Composition. *MERN, section Portail Québec – Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles*. Repéré à <http://www4.gouv.qc.ca/fr/Portail/citoyens/programme-service/Pages/Info.aspx?sqctype=mo&sqcid=14>
- Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation du Québec (MESI). (2017a). Bioénergie : Les ressources renouvelables du Québec pour de l'énergie verte et durable. *MESI, section Bibliothèques – Secteurs – Environnement – Aperçu de l'industrie – Bioénergie*. Repéré à <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/secteurs/environnement/aperçu-de-lindustrie/bioenergie/>
- Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation du Québec (MESI). (2017b). *Propulser le Québec par l'électricité : La filière québécoise des véhicules électriques*. Repéré à [https://www.economie.gouv.qc.ca/fileadmin/user\\_upload/VEHICULE\\_Electrique\\_V5\\_SPREAD.pdf](https://www.economie.gouv.qc.ca/fileadmin/user_upload/VEHICULE_Electrique_V5_SPREAD.pdf)

- Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). (2017). *Basic hydrogen strategy*. Repéré à [http://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226\\_003b.pdf](http://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf)
- Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES). (2016). *Cadre d'action national pour le développement des carburants alternatifs dans le secteur des transports et le déploiement des infrastructures correspondantes*. Repéré à [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Cadre\\_action\\_national\\_carburants\\_alternatifs\\_0.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Cadre_action_national_carburants_alternatifs_0.pdf)
- Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES). (2017). *Commissariat général au développement durable : Analyse coûts bénéfices des véhicules électriques. Les Voitures*. Repéré à <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Théma%20-%20Analyse%20coûts%20bénéfices%20des%20véhicules%20électriques.pdf>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES). (2018). *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique*. Repéré à [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2018.06.01\\_dp\\_plan\\_deploiement\\_hydrogene\\_0.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2018.06.01_dp_plan_deploiement_hydrogene_0.pdf)
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2015). *Hydrogen technologies safety guide*. Repéré à <https://h2tools.org/sites/default/files/60948.pdf>
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2016). *Guide to permitting hydrogen moto fuel dispensing facilities*. Repéré à <https://h2tools.org/sites/default/files/Motor%20Fueling%20Station%20Permit%20Guide%20Final%20March2016.pdf>
- Office québécoise de langue française (OQLF). (2016). *Vocabulaire du développement durable*. Repéré à [http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie\\_deve\\_durable/fiches/index.html](http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie_deve_durable/fiches/index.html)
- PMG Technologies (2011). *Qui est PMG. PMG Technologies, section Qui est PMG*. Repéré à <http://www.pmgtest.com/index.php/qui-est-pmg.html>
- Sénat (2018). *Développement de la filière hydrogène – 15<sup>e</sup> législature*. Repéré à <https://www.senat.fr/questions/base/2018/qSEQ180102754.html>
- Science Allemagne (2009). *Technologies et développements pour les véhicules électriques de demain : Programmes de soutien pour l'hydrogène et les piles à combustible, l'électromobilité et les travaux de recherche sur les batteries en Allemagne*. Repéré à [https://www.science-allemande.fr/fr/wp-content/uploads/2011/02/SA\\_Francais\\_301109.pdf](https://www.science-allemande.fr/fr/wp-content/uploads/2011/02/SA_Francais_301109.pdf)
- Services Techniques et Commerciaux Mij inc. (2013). *L'hydrogène : un vecteur énergétique devant faire partie du portefeuille d'énergies en appui au développement durable du Québec*. Repéré à [https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20130924\\_158\\_Services\\_Techniques\\_Commerciaux\\_Mij\\_M.pdf](https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20130924_158_Services_Techniques_Commerciaux_Mij_M.pdf)
- Smart Grids – Commission de régulation de l'énergie (CRE). (s. d.). *Les travaux de l'ADEME dans le développement de l'hydrogène énergie : Mobilité décarbonée*. Repéré à <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=hydrogene-ademe>

- Tecnum International Inc. et Concept Celsius International Inc. (2013). *Consultation publique sur les enjeux énergétique du Québec : OSEZ H2 : La filière hydrogène - Pour l'autonomie énergétique ainsi que la garantie d'enrichissement de la population québécoise*. Résumé exécutif présenté à la Commission sur les enjeux énergétique. Repéré à [https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20131016\\_456\\_Tecnum-Celsius\\_M2.pdf](https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20131016_456_Tecnum-Celsius_M2.pdf)
- TechnoCentre Éolien (2013). *La filière éolienne : un atout stratégique pour faire face aux enjeux énergétiques du Québec – Mémoire déposé à la commissions sur les enjeux énergétiques du Québec*. Repéré à [https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20130920\\_124\\_TechnoCentre\\_Eolien\\_M.pdf](https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20130920_124_TechnoCentre_Eolien_M.pdf)
- Transition énergétique Québec (TEQ). (2017). Mission. *TEQ, section À propos de TEQ – Mission*. Repéré à <http://www.transitionenergetique.gouv.qc.ca/a-propos-de-teq/mission/#.W8RvzWZ7S1s>
- Transition énergétique Québec (TEQ). (2018). La première station multiénergies permettant le ravitaillement en hydrogène renouvelable verra le jour à Québec. *TEQ, section accueil – Actualités*. Repéré à <http://www.transitionenergetique.gouv.qc.ca/actualites/details/comm/711/#.W9TEt2Z7S1s>
- Tugliq Énergie (2018). Boucle hydrogène. *Tugliq Énergie, section Solutions – Stokage*. Repéré à <http://tugliq.com/stockage/>
- Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). (2016). *Québec investit 200 000 dollars à l'institut de recherche sur l'hydrogène de l'UQTR*. Repéré à <https://blogue.uqtr.ca/2016/08/10/quebec-investit-200-000-a-linstitut-de-recherche-sur-lhydrogene-de-luqtr/>
- Villeneuve, C. et coll. (2014a). *35 questions pour une réflexion plus large sur le développement durable : grille d'analyse de la Chaire en éco-conseil*. Département des sciences fondamentales, Université du Québec à Chicoutimi. Repéré à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs2563316>
- Villeneuve, C. et coll. (2014b). *35 questions pour une réflexion plus large sur le développement durable : grille d'analyse de la Chaire en éco-conseil*. Département des sciences fondamentales, Université du Québec à Chicoutimi. Repéré à <http://ecoconseil.uqac.ca/outils/>
- Viseur, M. (2008). *Étude de faisabilité de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur alternatif d'énergie* (Mémoire de maîtrise). Université Libre de Bruxelles. Repéré à [http://mem-envi.ulb.ac.be/Memoires\\_en\\_pdf/MFE\\_07\\_08/MFE\\_Viseur\\_07\\_08.pdf](http://mem-envi.ulb.ac.be/Memoires_en_pdf/MFE_07_08/MFE_Viseur_07_08.pdf)
- Whitmore, J. et Pineau, P.-O. (2017). *État de l'énergie au Québec 2018*, Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. Repéré à [http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2017/12/EEQ2018\\_WEB-FINAL.pdf](http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2017/12/EEQ2018_WEB-FINAL.pdf)

## ANNEXE 1 – ACTEURS DE L'INDUSTRIE DE LA BIOÉNERGIE AU QUÉBEC

**Tableau A.1.1 Acteurs de l'industrie de la bioénergie au Québec** (compilé de : Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation du Québec (MESI), 2017a).

Secteur	Entreprise	Description
<b>Biocarburant</b>	Enerkem	Chef de file mondial de la production d'éthanol cellulosique de deuxième génération. Lien : <a href="http://enerkem.com/fr/accueil.html">http://enerkem.com/fr/accueil.html</a>
	Éthanol GreenField	Le plus important producteur d'éthanol au Canada. L'entreprise est au centre d'un écosystème industriel en bioénergie (éthanol de première et deuxième générations, biométhanisation, valorisation du CO <sub>2</sub> , etc. Lien : <a href="http://www.greenfield.com/?lang=fr">http://www.greenfield.com/?lang=fr</a>
	Rothsay Biodiesel	Premier producteur canadien de biodiésel de gras animal. Lien : <a href="http://www.rothsaybiodiesel.ca/francais/">http://www.rothsaybiodiesel.ca/francais/</a>
<b>Biogaz</b>	Biothermica	Concepteur des projets carbones intégrés dans le domaine des biogaz et du captage du méthane des mines. Lien : <a href="http://www.biothermica.com/fr">http://www.biothermica.com/fr</a>
	Bio-Terre Systèmes	Possède une technologie de digestion anaérobie basse température haute performance mise au point pour des fermiers. Lien : <a href="http://www.bioterre.com">http://www.bioterre.com</a>
	Terix-Envirogaz	Fournit les équipements et les services d'ingénierie nécessaires à la digestion anaérobie des matières organiques et du raffinage du biogaz. Lien : <a href="http://www.terixenvirogaz.com">http://www.terixenvirogaz.com</a>
	Xebex	Chef de file nord-américain dans la purification du biogaz Lien : <a href="http://www.xebecinc.com/fr/fr_home.php">http://www.xebecinc.com/fr/fr_home.php</a>
<b>Centrales thermiques</b>	Biothermica	Captage et valorisation du biogaz sur un site d'enfouissement. Lien : <a href="http://www.biothermica.com/fr">http://www.biothermica.com/fr</a>
	Domtar	Usines de cogénération à partir de biomasse forestière. Lien : <a href="https://www.domtar.com/fr">https://www.domtar.com/fr</a>
	EBI	Captage et valorisation de biogaz sur un site d'enfouissement. Lien : <a href="https://www.ebiqc.com">https://www.ebiqc.com</a>
	Kruger Énergie	Usine de cogénération à partir de biomasse forestière. Captage et valorisation de biogaz sur un site d'enfouissement. Lien : <a href="http://energy.kruger.com">http://energy.kruger.com</a>
	Produits forestiers Résolu	Usines de cogénération à partir de biomasse forestière. Lien : <a href="http://www.pfresolu.com/Etablissements/Energie/">http://www.pfresolu.com/Etablissements/Energie/</a>
<b>Cultures énergétiques</b>	Agro Énergie	Producteur de cultures énergétiques. Lien : <a href="http://agroenergie.ca">http://agroenergie.ca</a>
<b>Centres de recherche</b>	Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ)	Valorisation énergétique du dioxyde de carbone par microalgues. Lien : <a href="https://www.criq.qc.ca/fr/valorisation-energetique-du-dioxyde-de-carbone-par-microalgues.html">https://www.criq.qc.ca/fr/valorisation-energetique-du-dioxyde-de-carbone-par-microalgues.html</a>
	Centre de recherche sur les grains inc. (CEROM)	Formation du réseau d'essai et de développement de plantes bio-industrielles. Lien : <a href="https://www.cerom.qc.ca">https://www.cerom.qc.ca</a>
	Chaire de recherche industrielle sur l'éthanol cellulosique et sur les biocommodités	Recherche industrielle appliquée en production d'éthanol cellulosique de deuxième génération. Lien : <a href="https://www.usherbrooke.ca/recherche/fr/regroupements/chaire-institutionnelles/chaire-de-recherche-industrielle-sur-lethanol-cellulosique-et-sur-les-biocommodites/#c8340">https://www.usherbrooke.ca/recherche/fr/regroupements/chaire-institutionnelles/chaire-de-recherche-industrielle-sur-lethanol-cellulosique-et-sur-les-biocommodites/#c8340</a>
	Consortium de recherche et innovations en bioprocédés industriels au Québec (CRIBIQ)	Mise au point de bioprocédés performants et novateurs au Québec, notamment biofermentation, traitement de biomasses. Lien : <a href="http://www.cribiq.qc.ca">http://www.cribiq.qc.ca</a>
	FP Innovations	Optimisation de la chaîne de valeur du secteur forestier. Lien : <a href="https://fpinnovations.ca/Pages/index.aspx">https://fpinnovations.ca/Pages/index.aspx</a>
	Réseau BiofuelNet Canada	Centre d'excellence du Canada qui rassemble la communauté canadienne de recherche sur les biocarburants avancés (dits de deuxième et troisième génération). Lien : <a href="http://biofuelnet.ca">http://biofuelnet.ca</a>
	Réseau d'innovation en biocombustibles et bioproduits	Recherche et innovation sur la conversion de la biomasse en biocarburants de façon durable et responsable. Lien : <a href="http://mcnibb.mcgill.ca/fr/index.html">http://mcnibb.mcgill.ca/fr/index.html</a>
	Réseau Transtech	Un réseau de plus de 40 centres collégiaux de transfert technologique : Oleotech (biodiesel), Biopterre (bioproduits), CNETE et CEPROCQ. Lien : <a href="http://reseautranstech.qc.ca">http://reseautranstech.qc.ca</a>



## ANNEXE 2 – CRITÈRES ASSOCIÉS AUX DIMENSIONS DU DD

**Tableau A.2.1 Critères associés à la dimension éthique du développement durable** (modifié de : Villeneuve et coll., 2014b).

Dimension éthique						
Répondre aux questions d'équité, de justice, de solidarité, de cohérence						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
1	Favorise la réduction de la pauvreté en s'occupant du sort des plus démunis, pour satisfaire aux besoins du plus grand nombre ?	1				
2	Favorise la solidarité, l'engagement et l'assistance mutuelle entre des personnes ou des groupes ?	1				
3	Favorise la restauration des sites dégradés et la juste compensation pour les personnes touchées par les impacts négatifs d'un projet ?	1				
4	Favorise la recherche de solutions originales et de nouvelles façons de faire ?	3				
5	Favorise l'identification de valeurs communes et permet d'orienter l'action en cohérence avec des valeurs ?	1				

**Tableau A.2.1 Critères associés à la dimension écologique du développement durable** (modifié de : Villeneuve et coll., 2014b).

Dimension écologique						
Répondre aux besoins de qualité du milieu et de pérennité des ressources						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
6	Favorise l'utilisation des ressources renouvelables et assure les conditions de leur remplacement ?	3				
7	Favorise une utilisation judicieuse et rationnelle des ressources non renouvelables en tenant compte de leur caractère irremplaçable ?	3				
8	Favorise une utilisation judicieuse et rationnelle de l'énergie, en minimisant les impacts de sa production, de sa distribution et de sa consommation ?	3				
9	Limite les quantités de pollutions ou de déchets rejetés dans les écosystèmes ?	3				
10	Considère les impacts sur la biodiversité ?	1				
11	Favorise une utilisation optimale du territoire en fonction de la disponibilité des surfaces et des usages qui en sont faits ?	1				
12	Limite les rejets de polluants affectant globalement la biosphère ?	3				

**Tableau A.2.3 Critères associés à la dimension sociale du développement durable** (modifié de : Villeneuve et coll., 2014b).

Dimension sociale						
Répondre aux besoins sociaux et aux aspirations individuelles						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
13	Favorise une amélioration de santé générale des populations ?	3				
14	Limite les facteurs susceptibles de représenter des dangers pour la personne (criminalité, accidents, conditions de travail, milieu de vie, mobilité, alimentation, etc.) ?	1				
15	Facilite l'accès à différents types de formation et permet aux individus d'atteindre le niveau de formation et compétence qu'ils désirent ?	1				
16	Favorise l'intégration des individus à la société par une forme d'occupation valorisante ?	3				
17	Favorise un équilibre entre la liberté individuelle et la responsabilité de l'individu à l'égard de la collectivité ?	1				
18	Valorise l'accomplissement personnel et collectif ?	1				

**Tableau A.2.4 Critères associés à la dimension économique du développement durable** (modifié de : Villeneuve et coll., 2014b).

Dimension économique						
Répondre aux besoins matériels						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
19	Donne aux individus et aux collectivités la possibilité d'obtenir l'usage de biens et de capitaux ?	3				
20	Favorise la production et l'accès à des biens et services de la plus grande qualité possible ?	3				
21	Favorise des changements dans les modes de production et de consommation en vue de les rendre plus viables et plus responsables sur les plans social et environnemental ?	3				
22	Recherche la rentabilité dans une perspective de viabilité financière ?	3				
23	Permet d'améliorer la valeur des ressources et des biens qu'elle contribue à transformer ?	1				
24	Permet une juste redistribution de l'augmentation des richesses et des avantages pour le plus grand nombre ?	1				
25	Offre des conditions de travail acceptables et adéquates ?	3				

**Tableau A.2.5 Critères associés à la dimension culturelle du développement durable** (modifié de : Villeneuve et coll., 2014b).

Dimension culturelle						
Répondre aux besoins d'affirmation, d'expression, de protection et de mise en valeur de la diversité des traits culturels						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
26	Protège, met en valeur et favorise la transmission du patrimoine matériel et immatériel ?	1				
27	Encourage l'élargissement à la participation à la vie culturelle ?	1				
28	Favorise le dialogue entre et à l'intérieur des cultures ainsi que la diversité des formes d'expressions culturelles ?	1				
29	Développe un environnement structuré qui soutient les activités créatives culturelles ?	1				

**Tableau A.2.6 Critères associés à la dimension gouvernance du développement durable** (modifié de : Villeneuve et coll., 2014b).

Dimension gouvernance						
Répondre aux besoins de participation, de démocratie, d'intégration et de transparence						
Est-ce que le projet		Pondération	Évaluation	Actions actuelles et futures	Piste de bonification	Priorité
30	Favorise l'utilisation d'outils et de processus qui permettent à l'organisation de prendre de meilleures décisions, de concevoir de meilleurs politiques, stratégies, programmes ou projets et d'améliorer leurs pratiques de gestion en matière de DD ?	1				
31	Reconnait et encourage la participation du plus grand nombre d'acteurs au processus de décision ?	3				
32	Prévoit des mécanismes de suivi et d'évaluation de la prise en compte du DD ?	3				
33	S'intègre bien aux caractéristiques de la collectivité où il s'implante ?	3				
34	Rapproche le pouvoir d'action et de décision des personnes et des collectivités les plus concernées ?	1				
35	Favorise une gestion responsable des risques ?	3				

## **ANNEXE 3 – COMPLÉMENT D'INFORMATION SUR LES 35 QUESTIONS**

(tiré de : Villeneuve et coll., 2014a)

### **A. Dimension éthique : Répondre aux besoins d'équité, de justice, de solidarité, de cohérence**

#### **1. Lutte à la pauvreté**

Est-ce que le projet favorise la réduction de la pauvreté en s'occupant du sort des plus démunis, pour satisfaire aux besoins du plus grand nombre ?

La notion de pauvreté varie en fonction du contexte et des catégories d'acteurs et constitue un facteur majeur d'exclusion et une cause d'iniquité. Les personnes en situation de pauvreté extrême n'ont pas de marge de manœuvre pour satisfaire à leurs besoins essentiels et pour éviter de dégrader leur environnement.

Objectifs :

- Assurer aux plus démunis l'accès aux services essentiels (eau, énergie, transport, santé, éducation, logements, etc.);
- Éliminer les conditions de vie indignes;
- Mettre en place des actions ciblant les plus démunis à l'intérieur des communautés locales, au niveau national et à l'extérieur de la communauté.

#### **2. Solidarité**

Est-ce que le projet favorise la solidarité, l'engagement et l'assistance mutuelle entre des personnes ou des groupes ?

L'engagement et la solidarité permettent de surmonter des crises, et de progresser dans un climat de confiance mutuelle entre les individus et les peuples.

Objectifs :

- Considérer les besoins particuliers ou contextuels des groupes touchés;
- Chercher à améliorer l'autonomie des personnes;
- Respecter une répartition des avantages dans l'ensemble de la population;
- Viser l'équité;
- Améliorer l'accessibilité.

#### **3. Restauration et compensation**

Est-ce que le projet favorise la restauration des sites dégradés et permet la juste compensation pour les personnes touchées par les impacts négatifs d'un projet ?

La valorisation de l'équité intergénérationnelle et intragénérationnelle incite à distribuer, dans le temps et dans l'espace, les impacts positifs et/ou négatifs des projets de manière à ne pas favoriser un groupe ou une génération aux dépens des autres.

Objectifs :

- Prendre en charge la remise en état des milieux dégradés;
- Fixer des objectifs de restauration des écosystèmes;
- Prévoir la réhabilitation des sites dès l'étape de conception des projets;
- Offrir des compensations aux populations touchées par les impacts.

#### **4. Originalité et innovation**

Est-ce que le projet favorise la recherche des solutions originales et de nouvelles façons de faire ?

L'originalité et l'innovation permettent d'élargir le potentiel d'adaptabilité, pour offrir plus de choix aux individus actuels et à venir pour satisfaire à leurs besoins.

Objectifs :

- Valoriser la créativité et simuler l'imaginaire;
- Diversifier les options;
- Favoriser le potentiel d'innovation;
- Favoriser la recherche et le développement.

#### **5. Valeurs communes**

Est-ce que le projet favorise l'identification de valeurs communes et d'orienter l'action en cohérence avec ces valeurs ?

La prise en compte de la dimension éthique du développement durable passe par l'application de grands principes de diversification, de responsabilité, d'imputabilité, de solidarité avec les générations actuelles et futures, etc. Développer un comportement éthique, c'est d'abord identifier ces valeurs dans l'organisation pour œuvrer ensuite en cohérence avec ces valeurs.

Objectifs :

- Favoriser l'émergence et le partage de valeurs communes;
- Assurer la cohérence entre les actions et les valeurs d'une organisation.

### **B. Dimension écologique : Répondre aux besoins de qualité du milieu et de pérennité des ressources**

#### **6. Utilisation des ressources renouvelables**

Est-ce que le projet favorise l'utilisation des ressources renouvelables et assure les conditions de leur remplacement ?

L'utilisation prioritaire des ressources renouvelables sous leur seuil de renouvellement est nécessaire pour que les écosystèmes et les réserves minérales soient maintenus, de façon à satisfaire à très long terme les besoins des humains.

Objectifs :

- Utiliser en priorité les ressources renouvelables;
- Qualifier l'importance pour le maintien de la vie;
- Planifier une utilisation judicieuse des ressources renouvelables.

#### **7. Utilisation judicieuse des ressources non renouvelables**

Est-ce que le projet favorise une utilisation judicieuse et rationnelle des ressources non renouvelables en tenant compte de leur caractère irremplaçable ?

L'utilisation rationnelle des ressources non renouvelables vise à permettre aux générations futures de continuer à assurer la satisfaction de leurs besoins, même dans l'optique d'un épuisement éventuel de ces ressources.

Objectifs :

- Réduire l'utilisation des ressources non renouvelables;
- Utiliser ces ressources de façon optimale;
- Évaluer la possibilité de remplacement;
- Favoriser le recyclage.

### **8. Utilisation judicieuse de l'énergie**

Est-ce que le projet favorise une utilisation judicieuse et rationnelle de l'énergie, en minimisant les impacts de sa production, de sa distribution et de sa consommation ?

L'approvisionnement en énergie est indispensable à tous les niveaux de la société pour la satisfaction de besoins aussi essentiels que la cuisson, l'éclairage ou le chauffage, mais toute production d'énergie aura des conséquences environnementales, sociales et économiques, qui doivent être maîtrisées.

Objectifs :

- Planifier une utilisation judicieuse de l'énergie;
- Privilégier les formes d'énergie les plus adaptées aux besoins et au contexte;
- Favoriser les vecteurs d'énergie aux moindres impacts.

### **9. Maintien des extrants de l'activité humaine sous la capacité du support du milieu**

Est-ce que le projet limite les quantités de pollutions ou de déchets rejetés dans les écosystèmes ?

Par leur capacité de détoxification, les milieux naturels peuvent absorber une partie des extrants des activités humaines, mais ces derniers doivent être maintenus en deçà de la capacité de support des écosystèmes.

Objectifs :

- Développer une connaissance de la capacité de support des écosystèmes;
- Minimiser les extrants des activités;
- Minimiser les impacts des extrants;
- Mesurer les impacts des extrants sur les milieux;
- Assurer une saine gestion des déchets dangereux.

### **10. Maintien de la biodiversité**

Est-ce que le projet considère les impacts sur la biodiversité ?

La biodiversité inclut la diversité des individus, des espèces, des écosystèmes et des processus naturels, pour les espèces végétales et animales. Elle résulte des processus évolutifs et ne peut être remplacée. Elle constitue un facteur de stabilité et de flexibilité adaptative pour les organismes vivants. Elle constitue un moyen de répondre à des besoins de l'ordre de la richesse génétique, alimentaire ou esthétique pour l'humain.

Objectifs :

- Développer des connaissances sur la biodiversité et sur les conditions de son maintien;
- Mettre en place des mesures de suivi des indices de biodiversité;
- Protéger les espèces rares ou menacées, ainsi que leurs habitats;
- Valoriser les espèces à valeur symbolique.

## **11. Utilisation optimale du territoire**

Est-ce que le projet favorise une utilisation optimale du territoire, en fonction de la disponibilité des surfaces et des usages qui en sont faits ?

La grandeur du territoire exploitable sur la planète est limitée, malgré une population humaine sans cesse croissante. Il convient d'optimiser l'utilisation du territoire afin de subvenir aux besoins du plus grand nombre en évitant d'empiéter sur les zones d'habitat essentielles au maintien de la biodiversité.

Objectifs :

- Préserver la qualité des sols en limitant les impacts;
- Prendre en compte la conservation des habitats et des milieux fragiles;
- Optimiser l'utilisation du territoire;
- Contribuer au maintien de la diversité de paysages.

## **12. Réduction des polluants affectant globalement la biosphère**

Est-ce que le projet limite les rejets de polluants affectant globalement la biosphère ?

Les problèmes de changements de l'environnement planétaire peuvent avoir des impacts importants sur le maintien de la qualité de vie de l'humanité dans l'espace et dans le temps.

Objectifs :

- Réduire les quantités nettes de gaz à effet de serre émis ou présents dans l'atmosphère;
- Réduire les émissions de substances appauvrissant la couche d'ozone;
- Réduire les polluants organiques persistants;
- Prévoir des activités de rationalisation, d'interdiction d'usage, de substitution, de destruction ou d'absorption;
- Prévoir des mesures d'adaptations aux changements globaux.

## **C. Dimension sociale : Répondre aux besoins sociaux et aux aspirations individuelles**

### **13. Recherche d'un état de santé optimal des populations**

Est-ce que le projet favorise une amélioration de l'état de santé général des populations ?

L'état de santé optimal se définit comme le meilleur que peut atteindre une personne à un moment de son existence compte tenu des limitations propres à son potentiel génétique et à ses handicaps physiques ou mentaux. L'atteinte de cet état améliore la qualité de vie et permet aux personnes de répondre de façon autonome à leurs propres besoins dans la collectivité.

Objectifs :

- Améliorer ou maintenir l'état de santé de la population;
- Adopter une approche de responsabilisation, de dépistage et de prévention;
- Réduire les nuisances;
- Favoriser le contact entre les populations et la nature.

### **14. Recherche de condition de sécurité**

Est-ce que le projet limite des facteurs susceptibles de représenter des dangers pour la personne (criminalité, accidents, habitations, milieu de vie, mobilité, alimentation, etc.) ?

La sécurité et le sentiment de sécurité sont nécessaires au bien-être, à la liberté d'action des individus et au maintien de leur intégrité physique.

Objectifs :

- Privilégier les actions qui favorisent l'intégrité physique et psychologique;
- Créer un sentiment de sécurité collective et individuelle;
- Assurer une sécurité effective;
- Assurer l'éducation de base à la sécurité.

### **15. Amélioration du niveau d'éducation des populations**

Est-ce que le projet facilite l'accès à différents types de formation et permet aux individus d'atteindre le niveau de formation et de compétence qu'ils désirent ?

L'éducation vise à rendre les gens plus autonomes, à stimuler l'innovation et la productivité, ainsi qu'à améliorer la sensibilisation et la participation du public à la mise en œuvre du DD.

Objectifs :

- Assurer une éducation de base fonctionnelle à tous;
- Favoriser l'accès de chacun à son niveau d'éducation désiré;
- Permettre l'accès à une éducation et à une formation continue;
- Œuvrer à l'alphabétisation écologique des personnes.

### **16. Intégration des individus à la société**

Est-ce que le projet favorise l'intégration des individus à la société par une forme d'occupation valorisante ?

L'intégration des individus à la société réfère à toute forme d'occupation valorisante (dont un emploi rémunéré ou pas). Une occupation valorisante favorise l'épanouissement personnel d'un individu et son engagement envers la communauté.

Objectifs :

- Favorise l'accès à une occupation pour chacun;
- Favorise l'investissement personnel à long terme;
- Favorise l'engagement citoyen.

### **17. Liberté individuelle et responsabilité collective**

Est-ce que le projet favorise un équilibre entre la liberté individuelle et la responsabilité de l'individu à l'égard de la collectivité ?

Pour que des individus se réalisent pleinement et puissent fonctionner harmonieusement en société, ils doivent établir un équilibre entre leur liberté individuelle et leurs responsabilités collectives.

Objectifs :

- Permettre le développement de la confiance en soi;
- Favoriser l'accès aux loisirs et à la détente;
- Favoriser la connectivité, la mobilité et les échanges;
- Favoriser la cohésion sociale.



## **18. Reconnaissance des personnes et des investissements**

Est-ce que le projet valorise l'accomplissement personnel et collectif ?

La reconnaissance et la valorisation des accomplissements peuvent augmenter le sentiment d'appartenance à un groupe, susciter l'émulation, participer à l'amélioration des pratiques et inciter les individus à s'engager dans des activités d'investissement et de développement personnel.

Objectifs :

- Valoriser la participation et l'effort accompli par des moyens appropriés;
- Augmenter le sentiment d'appartenance;
- Valoriser l'accomplissement personnel;
- Valoriser l'atteinte d'objectifs de performance.

## **D. Dimension économique : Répondre aux besoins matériels**

### **19. Possession et usage des biens et des capitaux**

Est-ce que le projet donne aux individus et aux collectivités la possibilité d'obtenir l'usage de biens et de capitaux ?

L'humanité continue de s'accroître et les besoins matériels de chacun ne sont pas comblés. Cela peut devenir possible en produisant et en rendant accessible le plus grand nombre de biens utiles, en développant et en entretenant des infrastructures locales (transports, télécommunication, énergie, eau, etc.).

Objectifs :

- Offrir la possibilité d'accumuler des biens et des capitaux;
- Permettre au plus grand nombre d'utiliser des biens individuels et/ou collectifs;
- S'assurer d'une juste valeur pour le travail des personnes.

### **20. Qualité des biens et services**

Est-ce que le projet favorise la production et l'accès à des biens et services de la plus grande qualité possible ?

Un bien ou un service de qualité satisfait mieux et de façon plus durable les besoins pour lesquels il est destiné.

Objectifs :

- S'assurer de l'adéquation entre le produit et le besoin;
- S'assurer de la qualité et de la durabilité du produit.

### **21. Production et consommation responsable**

Est-ce que le projet favorise des changements dans les modes de production et de consommation en vue de les rendre plus viables et plus responsables sur les plans social et environnemental ?

La production et la consommation responsable permettent d'éviter le gaspillage, d'optimiser l'utilisation des ressources et de maximiser les retombées positives du développement économique.

Objectifs :

- Favoriser l'achat et la consommation responsable;

- Adopter des approches d'écoefficiente et d'écodesign, basées sur la gestion du cycle de vie;
- Favoriser le développement de l'économie sociale;
- Favoriser les circuits courts;
- Internaliser les externalités dans les couts.

## **22. Viabilité financière**

Est-ce que le projet recherche la rentabilité dans une perspective de viabilité financière ?

La viabilité économique est souvent une condition importante pour la réalisation et la pérennité des politiques, stratégies, programmes ou projets.

Objectifs :

- Développer une connaissance des besoins et des marchés;
- Rechercher l'optimisation du processus;
- S'assurer de la rentabilité ou de l'équilibre financier;
- Limiter les risques financiers.

## **23. Création de richesses**

Est-ce que le projet permet d'améliorer la valeur des ressources et des biens qu'elle contribue à transformer ?

Cette augmentation de valeur devrait se concrétiser par la valeur ajoutée que permettent les échanges économiques.

Objectifs :

- S'assurer que l'activité humaine génère une valeur d'échange;
- S'assurer d'une saine gestion des valeurs et des personnes.

## **24. Opportunité de partage de la richesse**

Est-ce que le projet permet une juste redistribution de l'augmentation des richesses et des avantages pour le plus grand nombre ?

Le partage équitable de la richesse permet d'augmenter la solidarité et de diminuer les disparités entre les individus. La participation du plus grand nombre à la richesse augmente les flux économiques et permet la satisfaction des besoins matériels d'une plus grande quantité de personnes.

Objectifs :

- Optimiser les retombées économiques du projet;
- S'assurer du mécanisme de redistribution;
- Favoriser l'accès au capital.

## **25. Conditions de travail**

Est-ce que le projet offre des conditions de travail acceptables et adéquates ?

Les conditions de travail incluent la rémunération, les avantages sociaux, l'ambiance sur les lieux de travail et les opportunités de développement de compétences. Des conditions de travail de favorisent l'accomplissement, l'engagement et la motivation des employés, tout en favorisant la rétention de la main-d'œuvre.

Objectifs :

- Améliorer les conditions de travail;
- Favoriser le maintien, le développement et la partage des compétences;

## **E. Dimension culturelle : Répondre aux besoins d’affirmation, d’expression, de protection et de mise en valeur de la diversité des traits culturels**

### **26. Transmission du patrimoine culturel**

Est-ce que le projet protège, met en valeur et favorable la transmission du patrimoine matériel et immatériel ?

Le patrimoine culturel reflète l’identité d’une société en transmettant les valeurs et savoirs de celle-ci de génération en génération. La protection de l’authenticité des expressions culturelles, lorsqu’elles sont menacées d’extinction ou de graves altérations, favorise le caractère DD.

Objectifs :

- Favoriser l’expression individuelle, la liberté et le pluralisme des croyances, des opinions et des identités;
- Mettre en œuvre des mesures de conservation, de restauration et de compensation du patrimoine culturel;
- Reconnaître la représentation culturelle de l’environnement;
- Développer la connaissance du passé et de l’histoire.

### **27. Pratiques culturelles et artistiques**

Est-ce que le projet encourage l’élargissement à la participation à la vie culturelle ?

L’élargissement à la participation à la vie culturelle nécessite l’accès à des infrastructures et des loisirs culturels.

Objectifs :

- Encourager l’expression culturelle;
- Affirmer le caractère pluriel et évolutif de la culture;
- Reconnaître l’importance des minorités et de leurs contributions à la société;
- Offrir un accès à la culture par l’éducation à tous les niveaux.

### **28. Diversité de l’offre culturelle**

Est-ce que le projet favorise le dialogue entre et à l’intérieur des cultures ainsi que la diversité des formes d’expressions culturelles ?

Encourager le dialogue entre les cultures afin d’assurer des échanges culturels équilibrés, dans le respect interculturel favorise la cohésion et la promotion d’une culture de la paix.

Objectifs :

- Favoriser l’interculturalité;
- Assurer l’équilibre et l’équité entre les cultures;
- Soutenir la diversité des expressions culturelles.

### **29. Contribution de la culture au développement économique**

Est-ce que le projet développe un environnement structuré qui soutient les activités créatives culturelles ?

Les pratiques culturelles peuvent être créatrices d'emplois et génératrices de revenus et donc contributives à la lutte contributive à la lutte contre la pauvreté.

Objectifs :

- Créer des conditions favorables à l'émergence d'une industrie culturelle génératrice d'emplois et d'emplois et de richesse;
- Rendre explicites les liens entre la culture, le développement, l'emploi et la prospérité économique.

## **F. Dimension gouvernance : Répondre à des besoins de participation, de démocratie, d'intégration et de transparence**

### **30. Gestion et aide à la décision**

Est-ce que le projet favorise l'utilisation d'outils et de processus qui permettent à l'organisation de prendre de meilleures décisions, de concevoir de meilleurs politiques, stratégies, programmes ou projets et d'améliorer leurs pratiques de gestion en matière de développement durable ?

L'utilisation d'outils et de processus de gestion et d'aide à la décision améliore la prise en compte des principes du développement durable, ils favorisent l'atteinte des orientations et des objectifs organisationnels en matière de développement durable.

Objectifs :

- Optimiser l'utilisation des outils et des processus de gestion;
- Améliorer les processus de décision;
- Viser l'amélioration continue.

### **31. Participation et démocratie**

Est-ce que le projet reconnaît et encourage la participation du plus grand nombre d'acteurs au processus de décision ?

Fondée sur l'efficacité des décisions prises par les individus, la participation et l'engagement des citoyens et des groupes qui les représentent sont nécessaires pour définir une vision concertée du développement.

Objectifs :

- Informer, consulter, concerter, mobiliser;
- Chercher à développer des partenariats;
- Favoriser l'engagement et la mobilisation;
- Instaurer une vision partagée;
- Favoriser la participation des parties prenantes;
- Assurer une information transparente par des mécanismes de communication appropriés;
- Favoriser la démocratie.

### **32. Suivi et évaluation**

Est-ce que le projet prévoit des mécanismes de suivi et d'évaluation de la prise en compte du DD ?

Le suivi et l'évaluation permettent de vérifier la progression selon les orientations, objectifs et cibles donnés. Cela permet d'apprécier en toute transparence la qualité de la démarche et des actions mises en place, pour publiciser les éléments novateurs.

Objectifs :

- Mettre en place des mesures de suivi et d'évaluation;
- Rendre des comptes de façon transparente.

### **33. Intégration du projet**

Est-ce que le projet s'intègre bien aux caractéristiques de la collectivité où il s'implante ?

Une bonne intégration et une cohérence des actions favorisent l'acceptabilité et la durabilité des politiques, stratégies, programmes et projets.

Objectifs :

- Considérer le contexte légal;
- Inclure des enjeux locaux;
- Assurer la cohérence et l'intégration;
- Assurer le réalisme et l'adaptabilité du projet.

### **34. Subsidiarité**

Est-ce que le projet rapproche le pouvoir d'action et de décision des personnes et des collectivités les plus concernées ?

L'application du principe de subsidiarité permet de trouver des solutions plus adaptées, le plus près de l'endroit où les problèmes se posent et avec les personnes et les collectivités directement touchées par ces problèmes.

Objectifs :

- Articuler les niveaux de prise de décision;
- Rapprocher la prise de décision des acteurs concernés;
- Mutualiser les moyens d'action;
- Favoriser la responsabilité des acteurs.

### **35. Gestion du risque**

Est-ce que le projet favorise une gestion responsable des risques ?

La bonne évaluation du risque passe par une mesure de la probabilité et de la gravité du dommage lié à un événement indésirable. Une bonne gestion des risques permet de réduire les probabilités et les conséquences néfastes des activités humaines et des aléas naturels.

Objectifs :

- Appliquer le principe de prévention;
- Appliquer le principe de précaution;
- Favoriser une répartition équitable des risques.